

**Refrigeração Industrial - Estágio na empresa J&E  
Hall Limited, Leeds, Reino Unido**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Projeto  
Instalação e Manutenção de Sistemas Térmicos

Autor

**Nuno Filipe Costa Alves**

Orientador

**Prof. Doutor João Manuel Nogueira Malça de Matos Ferreira**

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coimbra Novembro, 2014**

**Coimbra, Dezembro 2014**

## AGRADECIMENTOS

O seguinte relatório resume os projetos realizados durante um estágio curricular na sucursal de Leeds, da empresa de refrigeração “J & E Hall”, sendo o culminar de cinco anos de aprendizagem em Engenharia Mecânica, mais incisivamente na área térmica. Deixo assim, um profundo e sentido agradecimento aos principais responsáveis pela realização de mais esta etapa da minha formação académica.

Ao **Professor Doutor João Malça**, por todo o suporte dado durante o estágio e por todos os conhecimentos transmitidos no decorrer de toda a minha formação académica

Ao **Engenheiro Duncan Aspinall**, pelo apoio prestado durante o estágio e por todos os ensinamentos transmitidos na área comercial e técnica de refrigeração.

Ao **Engenheiro Óscar Lobo**, pela transmissão de conhecimentos técnicos de refrigeração e principalmente pela total disponibilidade oferecida a nível pessoal.

Ao **Engenheiro Manuel Camacho**, que tornou possível a realização do estágio, efetuando a ponte de comunicação entre a empresa e o Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Ao **colega Tiago Gomes**, pela companhia e amizade demonstrada durante a realização conjunta do estágio.

A **todos os meus professores**, pelo fornecimento de conhecimento que tornaram possível a realização do estágio e pela conclusão de mais esta etapa do meu percurso académico.

Aos **familiares e amigos**, pelo apoio prestado ao longo dos anos.

## RESUMO

O estágio em que este relatório se debruça decorreu na sucursal de Leeds da empresa J & E Hall, durante Outubro de 2013 a Abril de 2014 e foi frequentado por mim, Nuno Alves, em conjunto com o meu colega Tiago Gomes, no âmbito do programa Erasmus, do segundo ano do Mestrado em Sistemas e Equipamentos Mecânicos, na área de Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas Térmicos. Os programas que foram desenvolvidos e que irão ser abordados são:

- Cálculo de propriedades relativas a processos psicrométricos mais recorrentes em refrigeração e climatização;
- Seleção de válvulas de segurança para depósitos de refrigeração segundo a norma BS EN 13136;
- Dimensionamento de tubagens para sistemas de glicol, com o respetivo cálculo de perdas de carga e volume total de fluido frigorigéneo;

Em adição, os capítulos 4 e 5 abordam as restantes temáticas que foram desenvolvidas durante o estágio, sendo elas a elaboração de um programa Android para a empresa, que tem como função principal o cálculo de processos psicrométricos, e a utilização da ferramenta “*Flowsimulation*” do *software* “*Solidworks*”, com o objetivo de estudar a distribuição de temperaturas e o movimento do ar no interior de uma câmara frigorífica.

Os aplicativos informáticos que foram também desenvolvidos durante o estágio e que podem ser consultados no relatório do meu colega Tiago Gomes são os seguintes:

- Dimensionamento de tubagens para sistemas de amoníaco, com o respetivo cálculo de perdas de carga e volume total de fluido frigorigéneo;
- Cálculo das cargas térmicas associadas a uma câmara frigorífica;
- Dimensionamento de depósitos de acumulação em sistemas de amoníaco.

## ABSTRACT

The internship at which this report focuses took place in Leeds, in a branch of the company J & E Hall from October 2013 to April 2014 and it was attended by me, Nuno Alves, together with my colleague Tiago Gomes, under an Erasmus internship, in the second year of the Master Degree in Mechanical Equipment and Systems, in the area of Design, Installation and Maintenance of Thermal Systems. During the internship, several programs that have been developed:

- Pipe sizing for glycol systems, with the respective pressure drop calculation and total volume of refrigerant;
- Relief valve selection for refrigeration surge drum, according to BS EN 13136;
- Calculation of psychrometric properties for the most common processes in refrigeration and air conditioning.

Chapters five and six cover the remaining topics that were developed during the internship. These are the development of an Android application for the company and the use of the "Flowsimulation" tool available in the software "Solidworks", with the purpose of studying the temperature distribution and the air movement inside a refrigerated chamber.

The following applications were also developed during the internship and can be found in the report of my colleague Tiago Gomes:

- Calculation of thermal loads associated with a cold room;
- Pipe sizing for ammonia systems, with the respective pressure drop calculation and total volume of refrigerant;
- Sizing of accumulation deposits in ammonia systems.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. A Empresa J & E Hall.....	2
1.3. Objetivos e metodologia .....	3
1.3.1. Principais objetivos .....	3
1.3.2. Metodologia.....	3
1.4. Referências bibliográficas.....	3
 <b>2. CÁLCULO DE TRANSFORMAÇÕES PSICROMÉTRICAS .....</b>	 <b>5</b>
2.1. Enquadramento .....	5
2.2. Programa <i>Excel</i> para o cálculo de transformações psicrométricas .....	9
2.2.1. Verificar propriedades ( <i>Verify Properties</i> ).....	10
2.2.2. Arrefecimento simples ( <i>Simple Cooling</i> ).....	11
2.2.3. Aquecimento simples ( <i>Simple Heating</i> ).....	14
2.2.4. Arrefecimento e desumidificação ( <i>Cooling and Dehumidification</i> ) .....	16
2.2.5. Mistura de dois caudais de ar ( <i>Mixing</i> ) .....	19
2.2.6. Arrefecimento e desumidificação por meio de "Baterias húmidas" ( <i>Dehumidification coil</i> ) .....	21
2.3. Fórmulas consideradas para o cálculo das propriedades psicrométricas .....	24
2.3.1. Introdução de Temperatura de Bolbo Seco e Temperatura de Bolbo Húmido .....	24
2.3.2. Introdução da Temperatura de Bolbo Seco e Humidade Relativa .....	27
2.3.3. Determinação das propriedades termodinâmicas para o ponto resultante da mistura de dois caudais.....	27
 <b>3. DIMENSIONAMENTO DE VÁLVULAS DE SEGURANÇA SEGUNDO A NORMA BS-EN13136:2001 .....</b>	 <b>33</b>
3.1. Resumo dos cálculos especificados pela norma BS-EN13136:2001.....	33
3.1.1. Capacidade de descarga mínima da válvula de segurança .....	33
3.1.2. Expansão do líquido .....	35
3.1.3. Cálculo do caudal mássico de fluido frigorigéneo da válvula de pressão.....	37
3.1.4. Cálculo da área mínima da válvula de segurança, admissível pela norma. ....	38

---

3.1.5. Cálculo das perdas de carga a jusante e a montante da válvula de segurança .....	38
3.2. Aplicação informática .....	43
<b>4. APLICAÇÃO ANDROID PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS .....</b>	<b>49</b>
<b>5. SIMULAÇÃO DE FLUXO DE AR E DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NUMA CAMARA FRIGORÍFICA.....</b>	<b>57</b>
<b>6. CÁLCULO DE PERDAS DE CARGA EM SISTEMAS DE GLICOL .....</b>	<b>63</b>
6.1. Enquadramento .....	63
6.2. Fórmulas consideradas .....	64
6.2.1. Propriedades gerais do glicol e da tubagem .....	64
6.2.2. Caudal mássico de glicol .....	66
6.2.2. Diâmetro interno normalizado.....	66
6.2.3. Cálculo das perdas de carga .....	68
6.2.4. Cálculo da quantidade de glicol presente na instalação .....	71
6.3. Interface .....	72
<b>7. ATIVIDADES COMPLEMENTARES REALIZADAS DURANTE O ESTÁGIO ....</b>	<b>75</b>
<b>8. CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>81</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um diagrama psicrométrico (FRAZER Stephen). ....	6
Figura 2 – Exemplo de um diagrama psicrométrico (OGAWA Arthur, 2009).....	8
Figura 3 - Menu do programa para o cálculo de transformações psicrométricas.....	9
Figura 4 - Janela de introdução de valores para verificação de propriedades psicrométricas..	10
Figura 5 - Interface criada pela aplicação para um ponto psicrométrico.....	11
Figura 6 - Janela de introdução de valores para a transformação de arrefecimento simples. ..	12
Figura 7 - Documento PDF criado pela aplicação referente ao arrefecimento simples. ....	13
Figura 8 - Janela de introdução de valores para a transformação de aquecimento simples. ....	14
Figura 9 - Documento PDF criado pela aplicação referente ao aquecimento simples. ....	15
Figura 10 - Janela de introdução de valores para a transformação de arrefecimento seguido de desumidificação. ....	17
Figura 11 – Documento PDF criado pela aplicação referente ao arrefecimento seguido de desumidificação. ....	18
Figura 12 - Janela de introdução de valores para mistura de caudais de ar.....	19
Figura 13 - Documento PDF referente à mistura de dois caudais de ar. ....	20
Figura 14 - Janela de introdução de valores para arrefecimento e desumidificação por meio de uma “bateria húmida” .....	21
Figura 15 - Documento PDF criado pela aplicação para as transformações de arrefecimento e desumidificação por meio de uma “bateria húmida” .....	23
Figura 16 - Gráfico da temperatura de bolbo húmido função da entalpia do ar.....	28
Figura 17 - Diagrama psicrométrico onde estão representadas as linhas de desvio do valor de entalpia. ....	29
Figura 18 - Código de programação criado com o objetivo de se determinar a entalpia do ponto pretendido. ....	31
Figura 19 - Interface de introdução dos valores de entrada da aplicação.....	43
Figura 20 - Interface da aplicação para a determinação do volume de líquido presente num depósito de acumulação.....	45
Figura 21 – Dimensionamento de válvulas de segurança: exemplo de aplicação.....	46
Figura 22 - Dimensionamento de válvulas de segurança: valores de entrada assumidos de forma a que todos os requisitos sejam cumpridos.....	47
Figura 23 - Menu inicial da aplicação Android.....	49



Figura 24 – Processos psicrométricos disponíveis na aplicação Android desenvolvida.....	50
Figura 25 – Exemplo de cálculo na aplicação Android desenvolvida.....	51
Figura 26 - Janela com um exemplo de uma ajuda que a aplicação fornece para cada processo psicrométrico. ....	52
Figura 27 - Janela da aplicação contendo as propriedades de amoníaco para uma temperatura de saturação de -20°C. ....	53
Figura 28 - Janela da aplicação com as propriedades de amoníaco para uma pressão de saturação de 189 kPa. ....	54
Figura 29 - Janela da aplicação contendo informação sobre a empresa J&E Hall.....	55
Figura 30 - Representação 3D em Solidworks de um evaporador típico de um sistema de refrigeração.....	57
Figura 31 - Representação em Solidworks de uma câmara de refrigeração.....	58
Figura 32 - Representação do caudal de ar que entra em cada evaporador no estudo realizado. ....	59
Figura 33 - Representação do caudal de ar que abandona cada evaporador no estudo realizado. ....	59
Figura 34 - Pormenor da porta da câmara de refrigeração, estando no exterior uma temperatura de 3°C. ....	60
Figura 35 - <i>Frame</i> que ilustra o fluxo de ar ao sair dos evaporadores. ....	60
Figura 36 - <i>Frame</i> que ilustra o fluxo de ar ao sair dos evaporadores. ....	61
Figura 37 - <i>Frame</i> que ilustra a distribuição de temperaturas na câmara frigorífica. ....	61
Figura 38 - <i>Frame</i> que ilustra a distribuição de temperaturas na câmara frigorífica. ....	62
Figura 39 - <i>Frame</i> que ilustra a distribuição de temperaturas na câmara frigorífica ....	62
Figura 40 - Interface referente a sistemas de refrigeração onde glicol é aplicado. ....	73
Figura 41 - Condensadores de amoníaco instalados no topo de um edifício. ....	76
Figura 42 - Compressor de parafuso único "Hallscrew", fabricado pela "J & E Hall" ....	77

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de perda de pressão para diferentes elementos (BS EN13136:2001). .....	42
Tabela 2 - Coeficientes de relação entre o nível de líquido e o respetivo volume contido no interior do depósito (STOECKER WF, 1998). .....	44
Tabela 3 - Densidade de glicol em função da sua concentração. ....	64
Tabela 4 - Viscosidade do glicol em função da sua concentração e temperatura. ....	65
Tabela 5 - Calor específico de glicol em função da sua concentração e temperatura. ...	65
Tabela 6 - Espessura das paredes da tubagem em função dos seus diâmetros normalizados. ....	68
Tabela 7 - Valores de K <sub>l</sub> assumidos no aplicativo informático.....	70

## SIMBOLOGIA

$A [m^2]$  - Área transversal da válvula de segurança

$A_C [m^2]$  - Área atravessada pelo caudal calculado

$A_{in} [m^2]$  - Área transversal interior da tubagem a montante da válvula.

$A_{out} [m^2]$  - Área transversal interior da tubagem a jusante da válvula.

$A_R [m^2]$  - Área interna da tubagem

$A_{superfície} [m^2] = 2 \times \pi \times \frac{d}{2} \times L + 2 \times \left(\frac{d}{2}\right)^2$  - Área de superfície do depósito, considerando que tem uma forma cilíndrica

$C$  - Variável de correção função do expoente isentrópico do fluido frigorígeno

$c_p [kJ/kg.K]$  - Calor específico.

$DN$  - Dimensão nominal (EN ISO 6708:1995)

$d [m]$  - Diâmetro do depósito

$d_R [mm]$  - Diâmetro interno da tubagem

$EA [m^2]$  - Área útil da válvula

$h_{vap} [kJ/kg]$  - Entalpia de vaporização do fluido frigorígeno à temperatura que se encontra no depósito

$h [kJ/kg]$  - Entalpia do ar

$\Delta h_{ar} [kJ/kg]$  - Diferença de entalpias do ar nos pontos iniciais e finais do processo

$\sum K_L$  - Somatório dos coeficientes relativos aos acessórios presentes na tubagem

$h_w [kJ/kg]$  - Entalpia da água condensada no final do processo psicrométrico

$L [m]$  - Comprimento do depósito

$\dot{m} [kg/s]$  - Caudal mássico.

$\dot{m}_{ar} [kg/s]$  - Caudal mássico de ar húmido que participa no processo térmico

$\dot{m}_w [kg/s]$  - Caudal mássico de água condensada

$n [min^{-1}]$  – Frequência de rotação do compressor

$\eta_v$  - Rendimento volumétrico

$P [kW]$  – Potência frigorífica

$p_2 [bar]$  - Pressão à saída da linha, pressão atmosférica

$p_1 [bar]$  - Pressão à saída da válvula de segurança

$p_0 [bar] = 1,1 \times p_{set} + 1$  - Pressão de alívio da válvula corrigida segundo a norma

$\Delta p_{in} [bar]$  - Perda de pressão entre a saída do depósito e a válvula de segurança

$\Delta p_{out} [bar]$  - Perda de pressão na linha posterior à válvula de segurança

$p_b [bar]$  - Pressão absoluta depois da válvula de segurança, geralmente pressão atmosférica

$p_{set} [bar]$  - Pressão predeterminada à qual a válvula começa a abrir

$p_{atm} [bar]$  - Pressão atmosférica, considerada a 1,01325 bar (nível do mar)

$p_{s|T_{wb}} [kPa]$  – Pressão de saturação de vapor de água.

$p_{atm} [kPa]$  – Pressão atmosférica do ar, em kPa

PDF - *Portable document format*

$p_{v|T_{db}} [kPa]$  – Pressão parcial de vapor de água.

$\Delta_p [bar]$  – Perdas de pressão

$\dot{Q}_{latente} [kW]$  – Potência latente, responsável pela vaporização da água no processo

$\dot{Q}_{sensível} [kW]$  – Potência sensível, responsável pelas diferenças de temperatura no processo

$Q_h [kW]$  – Potência calorífica devido a fontes internas

$\dot{Q} [kW]$  – Potência calorífica transferida no processo térmico

$\dot{Q}_{total} [kW]$  – Potência calorífica total transferida no processo térmico de humificação por arrefecimento e desumificação por meio de baterias húmidas.

$RH$  [%] ou  $HR$  [%] - Humidade relativa do ar

$s$  [m] - Espessura do isolamento

$thickness$  [mm] – Espessura da parede da tubagem

$T$  [°C] - Temperatura

$Tdp$  [°C] - Temperatura de ponto de orvalho do ar

$Tdb$  [°C] - Temperatura de bolbo seco do ar

$Twb$  [°C] - Temperatura de bolbo húmido do ar

$u$  [m/s] - Velocidade

$u_{vapor}$  [m/s] - Velocidade horizontal do vapor

$V$  [m<sup>3</sup>] - Deslocamento teórico do compressor

$\dot{V}$  [m<sup>3</sup>/s] - Caudal volúmico

$\dot{V}_{ar}$  [m<sup>3</sup>/s] - Caudal volúmico de ar húmido que participa no processo térmico

$v_{ar}$  ou  $v$  [m<sup>3</sup>/kg<sub>a</sub>] - Volume específico do ar seco.

$v_0$  [m<sup>3</sup>/kg] - Volume específico de vapor ou líquido

$V_{liquido\ no\ deposito}$  [m<sup>3</sup>] - Volume de líquido presente no depósito

$VH$  [m<sup>3</sup>/h] – Deslocamento volumétrico horário do compressor.

$x$  [kg<sub>v</sub>/kg<sub>a</sub>] – Humidade específica do ar

$\varphi = 10\ kW/m^2$  - Ganho de calor pelo depósito pressurizado por metro quadrado de superfície

$\rho_{10}$  [kg/m<sup>3</sup>] - Massa específica de vapor do fluido frigorigéneo para a pressão de saturação a 10°C

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] - Massa específica

$K_{dr} = K_d \times 0,9$  - Coeficiente de descarga reduzida

$K_d$  - Coeficiente de descarga da válvula (dado pelo fabricante)

$K$  - Expoente isentrópico característico do fluido frigorigéneo

$K_b$  - Variável de correção para o caudal subcrítico

$\xi_{DN}$  - Coeficiente de perda de carga relativo a DN.

$\xi$  - Coeficiente de perda de carga

$\sum \xi$  - Somatório dos coeficientes da perda de pressão de cada componente

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

No mundo atual de alta competitividade técnica e económica, as empresas necessitam de adotar métodos eficientes tendo como objetivo apresentar aos seus clientes um produto que melhor se adequa às suas necessidades, a um preço competitivo. Desta forma, é necessário que adotem uma série de comportamentos de modo a exibirem propostas de qualidade aos melhores preços. Acompanhando esta linha de pensamento, uma empresa tem de se posicionar no mercado seguindo uma determinada orientação, onde os seguintes fatores se destacam pela positiva:

- Compreender o que cliente necessita e o preço que esta disposto a pagar;
- Apresentar uma proposta no mais curto espaço de tempo possível;
- Expor a proposta ao cliente, explicando as vantagens e as desvantagens da mesma, esclarecendo a razão pela qual essa opção é a mais adequada às suas necessidades, tendo em conta o preço que se dispõe pagar.

O relatório que se apresenta de seguida foca as atividades relevantes efetuadas durante um estágio numa empresa de refrigeração J & E Hall, que teve como principal objetivo a criação de aplicações informáticas que permitissem o cálculo rápido e simples de variáveis necessárias ao projeto de um sistema de refrigeração industrial.

## **1.2. A Empresa J & E Hall**

A J & E Hall é uma empresa multinacional com mais de um século de existência, líder global na indústria de refrigeração e climatização, tendo como principais atividades a conceção, desenvolvimento e fabrico de soluções de refrigeração e climatização.

Conta com fábricas no Reino Unido, Itália, EUA, China e Malásia, que têm como princípio de funcionamento a utilização das mais inovadoras técnicas, concebendo assim produtos de excelência no ramo da engenharia. Por sua vez, a atividade de vendas desenrola-se mais incisivamente no Reino Unido, embora tenha uma abrangência a nível global.

Na última década a empresa tem crescido todos os anos, principalmente depois de ter sido adquirida pelo grupo Daikin em 2006. O desenvolvimento e produção de compressores com a tecnologia de parafuso único, que tem o nome de “Hallscrew” tem um papel preponderante no reconhecimento da empresa como empresa de topo de refrigeração, desenvolvendo constantemente os seus produtos e soluções.



## **1.3. Objetivos e metodologia**

### **1.3.1. Principais objetivos**

No início do estágio profissional o tutor clarificou os objetivos para os seis meses seguintes, sendo eles o planeamento, desenvolvimento e melhoramento de aplicações em *Excel*, que permitissem um rápido e simples dimensionamento dos principais cálculos aplicados ao planeamento de sistemas de amoníaco e glicol, sendo estes os mais utilizados pela empresa.

### **1.3.2. Metodologia**

A metodologia adotada desde o início da criação dos aplicativos informáticos passou principalmente pela fase do planeamento e pesquisa, pois concluiu-se que uma eficiente organização e preparação de cada aplicativo traria mais-valias para o desenvolvimento dos mesmos, uma vez que se evitariam possíveis falhas e consequentes retrocessos na sua execução.

Para além disto, decidiu-se que a interface de cada aplicação seria previamente pensada e elaborada em rascunho em consonância com os restantes funcionários da empresa, uma vez que se pretendia que estes fossem facilmente entendidos e utilizados por todos.

A última fase da conceção foi a verificação dos valores obtidos por cada *software* com os valores verificados em cálculos realizados pela empresa em projetos anteriores.

## **1.4. Referências bibliográficas**

A elaboração de cada *software* exigiu um enorme trabalho de pesquisa de informação, em livros, relatórios técnicos e catálogos, bem como em documentos presentes no escritório da empresa.

Os livros e manuais mais consultados foram o *ASHRAE Refrigeration Handbook* (2006) e o *Industrial Refrigeration Handbook* de Wilbert F. Stoecker (1998).



## 2. CÁLCULO DE TRANSFORMAÇÕES PSICROMÉTRICAS

### 2.1. Enquadramento

O diagrama psicrométrico é um ábaco que permite retirar diferentes dados termodinâmicos do ar a uma pressão atmosférica constante, sendo o mais comum aquele que se encontra ao nível do mar, ou seja 101325 Pa.

As propriedades que se podem obter através deste diagrama são as seguintes:

- Temperatura de bolbo seco, ou em inglês, *Dry Bulb Temperature*, que é medida por um termómetro comum e tipicamente representada no eixo das abcissas. Geralmente esta temperatura encontra-se na maioria dos diagramas psicrométricos em grau Celcius (°C). Nos diagramas que foram desenvolvidos segundo o Sistema Imperial a unidade mais utilizada é o grau Fahrenheit (°F).

- Temperatura de bolbo húmido, ou em inglês, *Wet Bulb Temperature*, é a propriedade que está relacionada com a mistura de ar e água presente na atmosfera. Este valor corresponde à temperatura mínima que pode ser atingida através de um arrefecimento puramente evaporativo. Na prática pode ser determinada através de um termómetro cujo bolbo é envolvido por um pano húmido, sendo o seu valor igual à temperatura do bolbo seco quando o ar se encontra totalmente saturado, ou seja, quando a humidade relativa é igual a 100%.

- A Humidade Relativa é por definição o rácio entre a pressão parcial de vapor de água a uma dada temperatura e a pressão parcial de vapor de água para condições em que o ar se encontra saturado. Esta propriedade tem o valor de 1, ou 100%, quando o ar se encontra saturado, não conseguindo “absorver” mais água no estado de vapor. Neste caso a temperatura de bolbo seco é igual à temperatura de bolbo húmido.

- A Temperatura de ponto de orvalho, ou em inglês, *Dew Point Temperature* é a temperatura para a qual o ar estaria totalmente saturado, humidade relativa igual a 100%, contendo em si a máxima quantidade possível de vapor de água (humidade específica) para as condições presentes. De uma forma simplificada é a temperatura para a qual o vapor de água começaria a transformar-se em líquido, ocorrendo a sua condensação para valores de temperatura imediatamente inferiores, pois não conseguiria incluir mais vapor de água, uma vez que está totalmente saturado.

- A humidade absoluta ou específica é a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco. A unidade mais utilizada para quantificar esta propriedade é o quilograma de vapor

de água por quilograma de ar seco ( $\text{kg}_v/\text{kg}_a$ ).

- A entalpia específica é a propriedade que corresponde à soma da energia interna de um quilograma de ar com o produto da pressão e do volume a que se encontra. Para aplicações de climatização e refrigeração esta propriedade é talvez a mais importante de definir, pois permite calcular a energia que é necessário fornecer ou retirar ao ar para se conseguir atingir a temperatura e a humidade pretendida ( $\text{kJ}/\text{kg}_a$ ).

- Volume específico é o volume que um quilograma de ar seco ocupa a uma determinada temperatura de bolbo seco. A unidade usada habitualmente é o metro cúbico por quilograma de ar seco ( $\text{m}^3/\text{kg}_a$ ).

Para determinar as diferentes propriedades é necessário conhecer pelo menos duas delas, sendo as mais utilizadas a temperatura de bolbo seco, temperatura de bolbo húmido e humidade relativa.

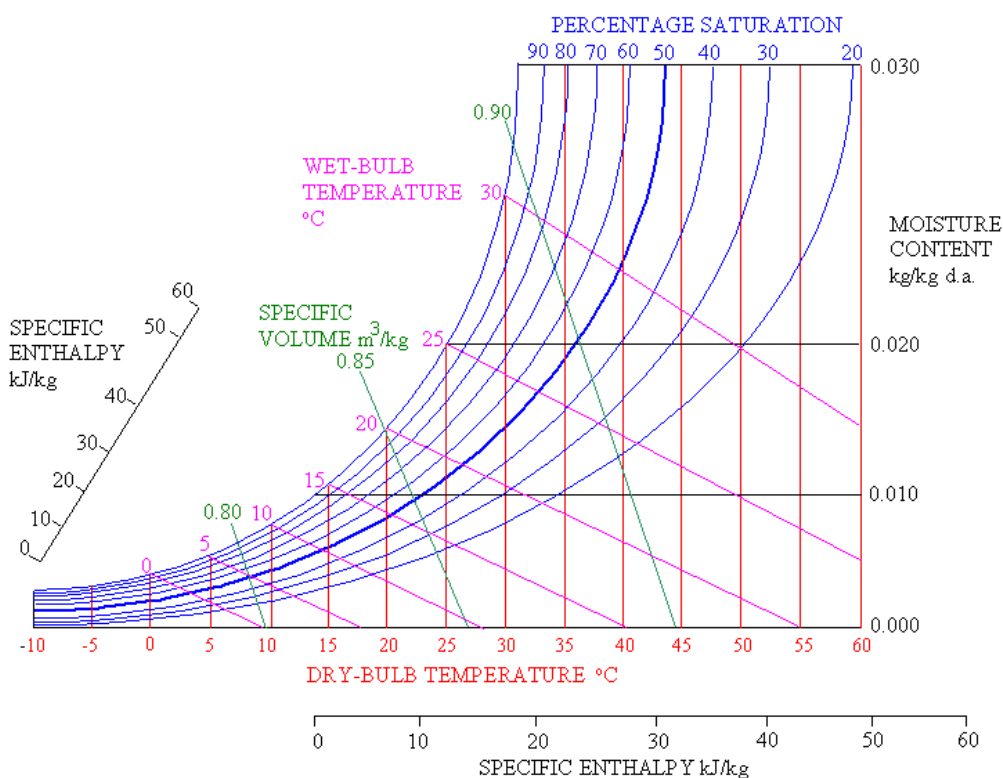


Figura 1 - Representação de um diagrama psicrométrico (*FRAZER Stephen*).

No decorrer do estágio foi proposto o desenvolvimento de uma aplicação que permitisse o cálculo rápido da energia envolvida em processos psicrométricos, sendo para tal necessário introduzir os valores de entalpia. No entanto, à medida que o *software* se desenvolveu foi possível assegurar que este calculava as principais transformações psicrométricas, introduzindo apenas duas propriedades termodinâmicas, como por exemplo, a temperatura de bolbo seco e temperatura de bolbo húmido.

As transformações mais utilizadas nas áreas de climatização e refrigeração que o *software* permite calcular são as seguintes:

- Arrefecimento simples, que se caracteriza pela diminuição da temperatura de bolbo seco segundo uma linha de humidade específica constante, ou seja, é um processo de arrefecimento sem alteração do conteúdo de vapor de água no ar.

- Aquecimento simples, que é o processo oposto ao arrefecimento simples, pois ao contrário deste é realizado um aquecimento ao ar, resultando no aumento da temperatura de bolbo seco. É necessário fornecer calor sensível ao ar, contrariamente à transformação anterior, onde é necessário retirar calor sensível.

- Arrefecimento e desumidificação, que tem como objetivo remover vapor de água do ar através de um arrefecimento que vai para além do ponto de saturação. Quando este é atingindo, o vapor de água começa a condensar, ocorrendo a diminuição da humidade específica do ar. Nesta fase do processo ocorre o decréscimo da temperatura de bolbo seco segundo a linha de humidade relativa igual a 100%, ou seja o ar encontra-se totalmente saturado.

- Arrefecimento e desumidificação através de baterias húmidas, sendo estas constituídas por conjunto de tubos de cobre em forma de serpentinas que se estendem fisicamente através de alhetas, aumentando assim a área de transferência de calor com o ar. Como a sua temperatura é inferior à temperatura de ponto de orvalho do ar, parte do vapor de água condensa, reduzindo-se assim a humidade. Este processo distingue-se do anterior, pois existe ar que não sofre qualquer tipo de alteração devido ao facto de não entrar em contacto com as alhetas, sendo o estado final do ar correspondente a um estado intermédio, que geralmente não se encontra totalmente saturado.

- Mistura adiabática de dois caudais de ar, que como o nome indica é o processo onde é realizada a mistura de dois fluxos de ar que se encontram em diferentes estados psicrométricos, resultando à saída um caudal de ar com características intermédias aos dois caudais de entrada.

Ao longo do desenvolvimento desta aplicação foram utilizadas fórmulas teóricas, como por exemplo a fórmula da humidade específica que é determinada através da equação dos gases perfeitos, e fórmulas práticas, sendo estas aproximações laboratoriais de fenómenos físicos.

Nas figuras seguintes é possível observar todas as equações utilizadas na aplicação e que permitem a obtenção de todas as transformações psicrométricas. As fórmulas suplementares que foram empregues durante a elaboração da aplicação serão exibidas mais adiante neste capítulo.

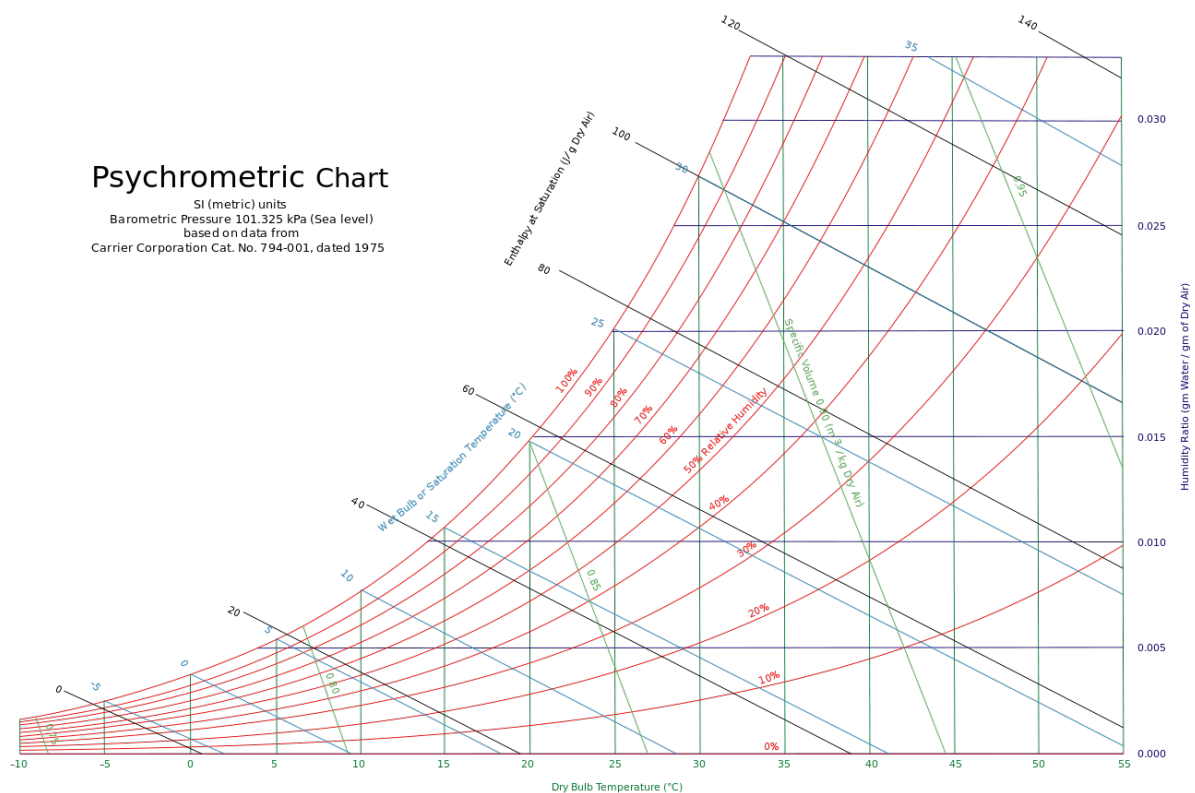


Figura 2 – Exemplo de um diagrama psicrométrico (OGAWA Arthur, 2009).

## 2.2. Programa *Excel* para o cálculo de transformações psicrométricas

O programa desenvolvido durante o estágio na empresa J&E Hall em Leeds permite calcular as seguintes transformações psicrométricas:

- Arrefecimento Simples;
- Aquecimento Simples;
- Arrefecimento e desumidificação;
- Mistura adiabática de dois caudais de ar;
- Arrefecimento e desumidificação por meio de uma bateria húmida;
- Mistura de caudais de ar seguida de arrefecimento e desumidificação por meio de uma bateria húmida;

Para além destes processos psicrométricos, a aplicação permite ainda o cálculo de diversas propriedades termodinâmicas, explicadas anteriormente neste capítulo. É de notar que estas são também calculadas para os pontos iniciais, intermédios e finais quando se realiza o cálculo dos processos psicrométricos enunciados acima.

A figura 3 apresenta o menu de entrada, quando o utilizador inicia a aplicação. Nela podem-se observar os botões que, ao serem clicados, possibilitam a abertura das diferentes janelas de cada processo.

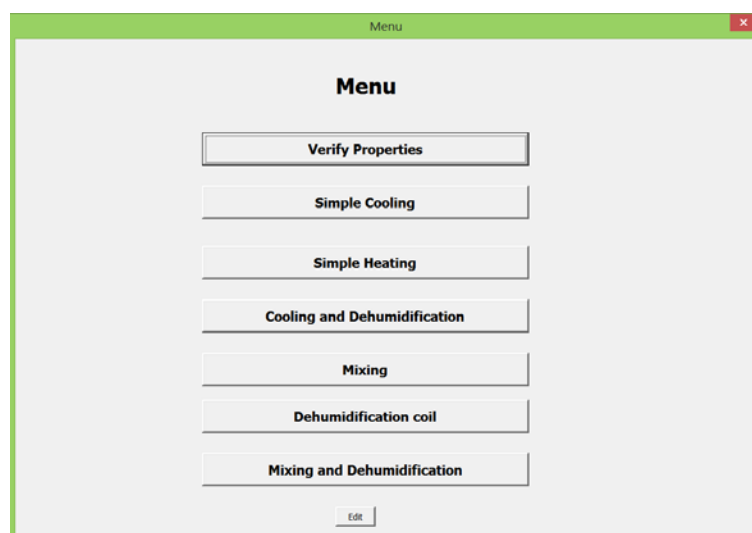
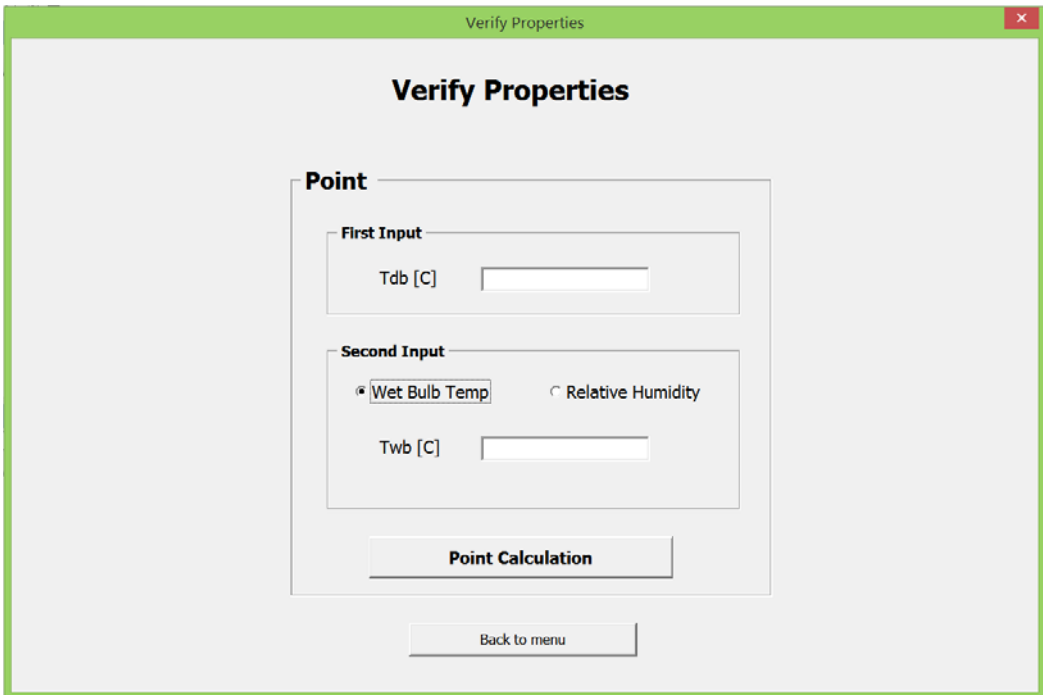


Figura 3 - Menu do programa para o cálculo de transformações psicrométricas.

### 2.2.1. Verificar propriedades (*Verify Properties*)

Ao clicar no botão “Verify properties” é aberta uma nova janela que permite inserir os dois valores de entrada necessários. A introdução da temperatura de bolbo seco (Tdb) é sempre obrigatória e o segundo valor pode ser a Temperatura de Bolbo Húmido (Twb) ou a Humidade Relativa (RH). A escolha entre os dois é feita através de dois “radio buttons” que, ao serem clicados, disponibilizam ao utilizador o campo de entrada que permite a introdução do valor de cada propriedade.

A imagem seguinte mostra a janela que é exibida quando é escolhida a opção de inserção da temperatura de bolbo húmido (*Wet Bulb Temperature*).



The screenshot shows a software window titled "Verify Properties". Inside, there is a section labeled "Point" which contains two input fields. The first is labeled "First Input" and "Tdb [C]". The second is labeled "Second Input" and "Twb [C]". Above the "Twb [C]" field are two radio buttons: "Wet Bulb Temp" (which is selected) and "Relative Humidity". Below these inputs is a button labeled "Point Calculation". At the bottom of the window is a button labeled "Back to menu".

Figura 4 - Janela de introdução de valores para verificação de propriedades psicrométricas.

Depois de introduzidos os valores nos dois campos de entrada e de se clicar no botão “Point Calculation”, a aplicação cria um ficheiro PDF com as propriedades do ponto. É de notar também que, se os valores não forem válidos, surge uma mensagem de erro e o programa não avança até serem inseridos dados válidos.

A figura 5 exhibe o conteúdo que é disponibilizado no ficheiro *Excel*. Neste caso particular foram introduzido os valores de entrada de 24°C de Temperatura de Bolbo Seco e de 16°C de



Temperatura de Bolbo Húmido.

Inputs	
Point	
Tdb1 [°C]	24
Twb1 [°C]	16
RH [%]	42.72

AtmPress	101325.35 Pa
----------	--------------

Point 1	
Moisture Cont.	0.0079 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Moisture Cont.	7.9 g <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Enthalpy	44.2 kJ/kg <sub>dryair</sub>
Sp. Volume	0.8526 kg/m <sup>3</sup>
Dew. Point	10.4 °C

Figura 5 - Interface criada pela aplicação para um ponto psicrométrico.

### 2.2.2. Arrefecimento simples (*Simple Cooling*)

Tal como foi referido anteriormente, o arrefecimento simples é um processo onde a temperatura do bolbo seco do ar diminui segundo uma linha de humidade específica constante. Durante esta transformação a instalação absorve calor do ar, e a potência térmica envolvida é igual ao produto da diferença de entalpias do ar (antes e depois do arrefecimento), e o seu caudal mássico.

$$\dot{Q} [kW] = \dot{m}_{ar} \times |\Delta h_{ar}| \quad (\text{Santos, 2011})$$

Como o segundo ponto tem entalpia inferior ao primeiro, o valor da diferença entre elas será negativo. Por este facto, é necessário realizar o módulo desta operação matemática, de forma a obter um valor de potência positivo.

Na figura 6 é possível ver a janela que o *software* apresenta quando se escolhe a opção “Arrefecimento Simples”. À semelhança do processo anterior, os valores de entrada do ponto 1 são a Temperatura de Bolbo Seco, e a Temperatura de Bolbo Húmido ou a Humidade Relativa. Neste caso particular é necessário definir estas propriedades do ar antes do arrefecimento, e a temperatura do bolbo seco posteriormente à transformação. Para além destas,

terá de ser introduzido o caudal de ar que intervém neste processo. Este valor pode ser introduzido pelo utilizador em caudal mássico (kg/s) ou em caudal volúmico ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Se for introduzido o segundo valor, a aplicação converte-o automaticamente para caudal mássico, dividindo este valor pela massa específica do ar, que corresponde ao inverso do volume específico.

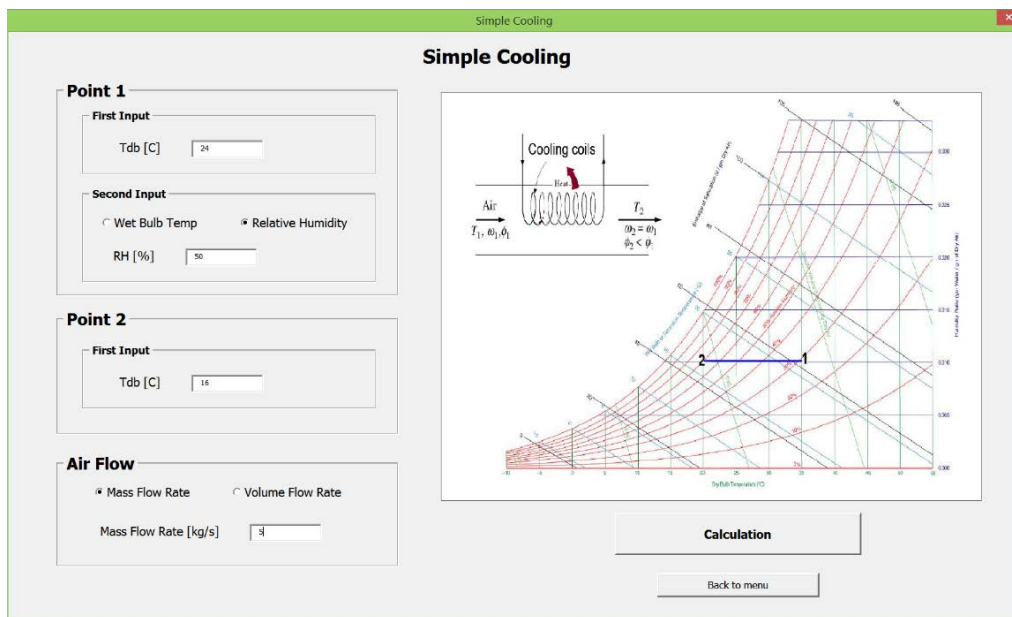
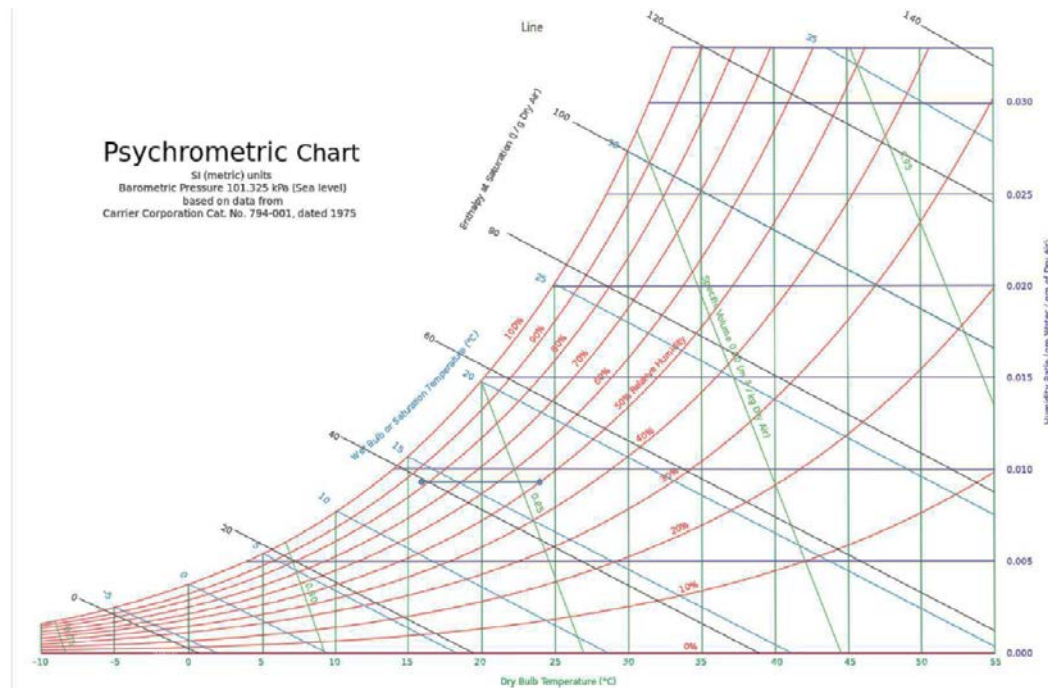


Figura 6 - Janela de introdução de valores para a transformação de arrefecimento simples.

Depois da introdução dos valores de entrada, as seguintes tabelas são criadas em formato PDF. Nelas é possível observar as propriedades termodinâmicas de cada ponto e a potência térmica que é retirada ao ar, ou seja, que o sistema de refrigeração terá que absorver por meio do fluido frigorigéneo. No ficheiro é também gerado um esquema do processo no diagrama psicrométrico, onde é possível observar a linha que caracteriza o arrefecimento, sendo esta um segmento de reta horizontal, pois é realizado segundo humidade específica constante.



Points Inputs					
Point 1			Point 2		
Tdb [°C]	24		Tdb2 [°C]	16	
Twb [°C]	17.14		Twb2 [°C]	14.13	
RH [%]	50.00		RH [%]	81.66	

AtmPress	101325.35 Pa
----------	--------------

Point 1	
Moisture Cont.	0.0093 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Moisture Cont.	9.3 g <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Enthalpy	47.718 [kJ/(kg·K)]
Sp. Volume	0.854 kJ/kg <sub>dryair</sub>
Dew. Point	12.8 °C

Point 2	
Moisture Cont.	0.0093 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Moisture Cont.	9.3 g <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Enthalpy	39.534 [kJ/(kg·K)]
Sp. Volume	0.831 kJ/kg <sub>dryair</sub>
Dew. Point	12.8 °C

Flow Rate Inputs	
Mass flow rate [kg/s]	5.00

Simple Cooling	
Cooling Capacity [kW]	40.92
Volume flow rate [m <sup>3</sup> /s]	4.27

Figura 7 - Documento PDF criado pela aplicação referente ao arrefecimento simples.

### 2.2.3. Aquecimento simples (*Simple Heating*)

Um processo psicrométrico de aquecimento simples pode ser calculado quando se seleciona o terceiro botão do menu. O cálculo desta transformação é bastante semelhante ao do arrefecimento simples, pois é realizado segundo a linha de humidade específica constante, porém difere deste na medida em que é necessário fornecer energia calorífica ao ar, ao invés de a retirar.

A seguinte equação permite o cálculo dessa energia.

$$\dot{Q} [kW] = \dot{m}_{ar} \times \Delta h_{ar} \quad (\text{Santos, 2011})$$

A seguinte imagem mostra a janela que é exibida quando se seleciona a opção “Simple Heating”. Como se pode reparar, a interface é igual à do arrefecimento simples, apenas mudando o esquema do processo, que é inverso ao sentido do anterior.

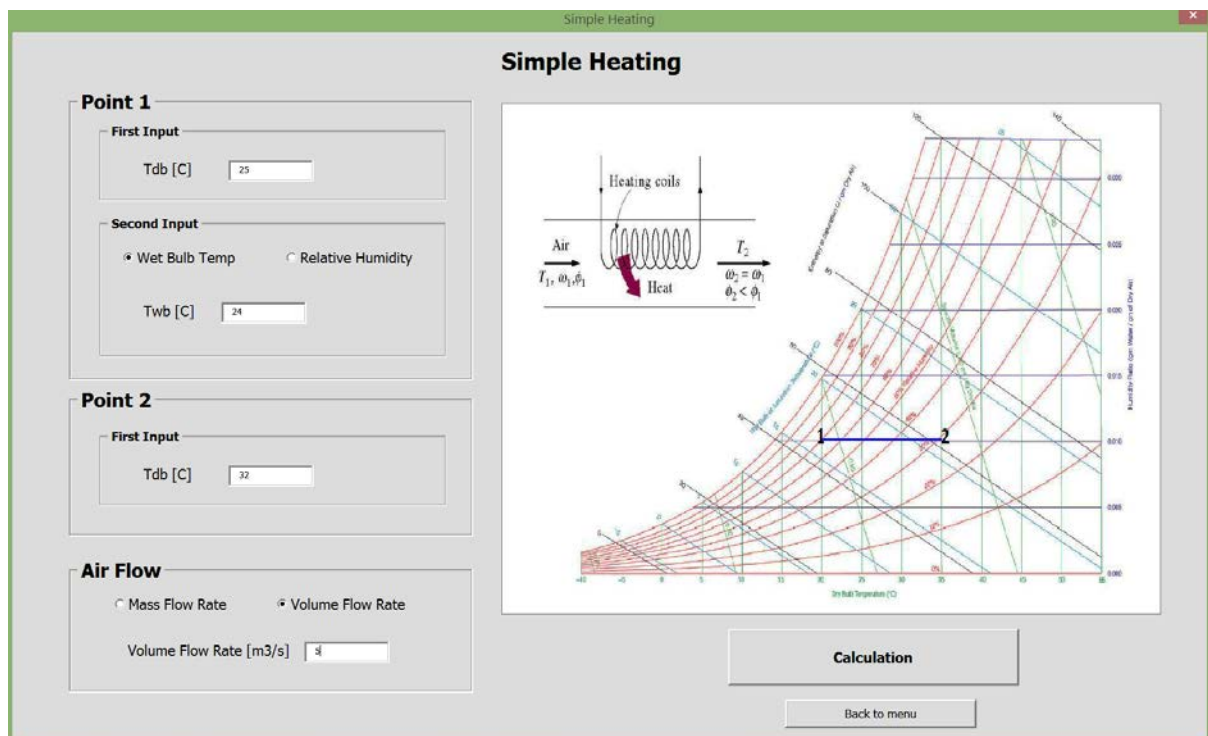
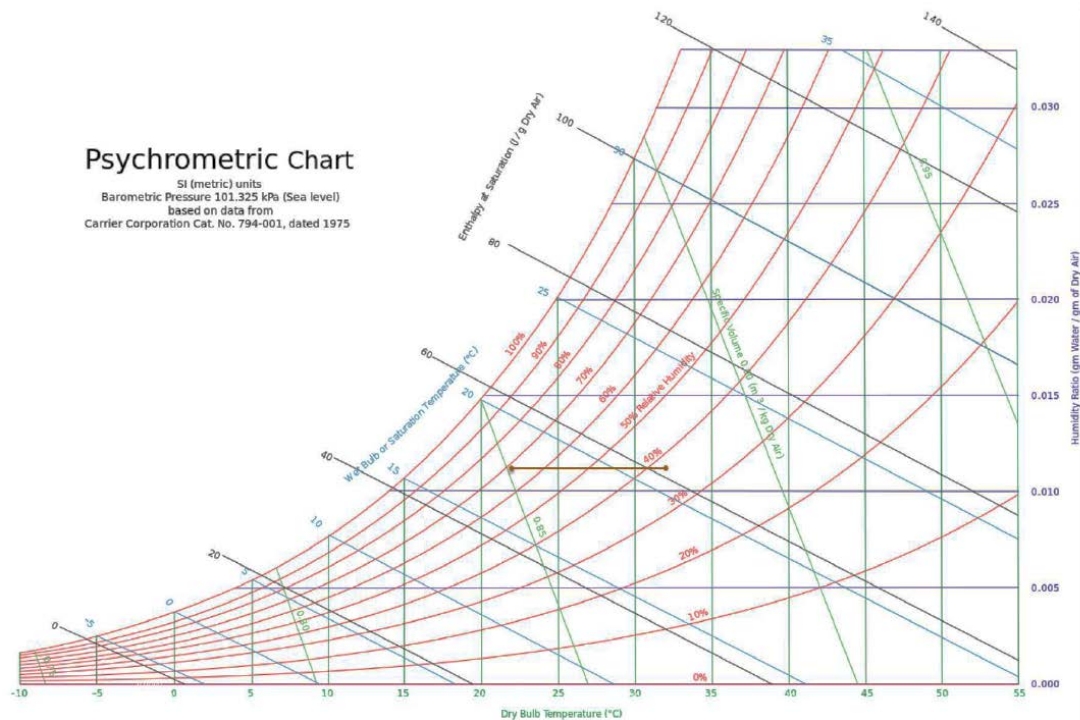


Figura 8 - Janela de introdução de valores para a transformação de aquecimento simples.



Points Inputs					
Point 1			Point 2		
Tdb [°C]	22		Tdb2 [°C]	32	
Twb [°C]	18.00		Twb2 [°C]	21.19	
RH [%]	67.78		RH [%]	37.46	

AtmPress	101325.35 Pa
----------	--------------

Point 1	
Moisture Cont.	0.0112 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Moisture Cont.	11.2 g <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Enthalpy	50.496 [kJ/(kg·K)]
Sp. Volume	0.851 kJ/kg <sub>dryair</sub>
Dew. Point	15.7 °C

Point 2	
Moisture Cont.	0.0112 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Moisture Cont.	11.2 g <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Enthalpy	60.762 [kJ/(kg·K)]
Sp. Volume	0.880 kJ/kg <sub>dryair</sub>
Dew. Point	15.7 °C

Flow Rate Inputs	
Mass flow rate [kg/s]	5.00

Simple Heating	
Heating Capacity [kW]	51.33
Volume flow rate [m <sup>3</sup> /s]	4.26

Figura 9 - Documento PDF criado pela aplicação referente ao aquecimento simples.

#### 2.2.4. Arrefecimento e desumidificação (*Cooling and Dehumidification*)

Como foi referido anteriormente, o processo psicrométrico de arrefecimento e desumidificação consiste na retirada de humidade do ar, realizando um arrefecimento onde a temperatura vai para além da temperatura de ponto de orvalho, ocorrendo a partir deste ponto a condensação de algum vapor de água.

Os valores de entrada para o primeiro ponto são a Temperatura de Bolbo Seco, que é de introdução obrigatória, e a Temperatura de Bolbo Húmido ou a Humidade Relativa, tendo o utilizador de introduzir uma destas duas propriedades para definir corretamente o ponto.

Tendo em conta que o ponto final desta transformação psicrométrica tem humidade relativa igual a cem por cento, apenas é necessária a introdução da sua temperatura de bolbo seco.

Para além da inserção dos dois pontos que definem os limites do arrefecimento e desumidificação, o utilizador terá de colocar também o caudal volúmico ou o caudal mássico de ar que intervém neste processo.

A seguinte fórmula permite quantificar a energia total que é necessário retirar ao ar para as condições introduzidas pelo utilizador:

$$\dot{Q} [kW] = \dot{m}_{ar} \times \Delta h_{ar} - \dot{m}_w \times h_w \quad (\text{Santos, 2011})$$

Tal como acontece nos restantes processos, depois de concluída a introdução de valores é criado um ficheiro PDF com todos os dados relevantes. A figura 11 ilustra mostra as tabelas que são apresentadas no documento criado. É de notar também que o cálculo da entalpia da água é obtido através da seguinte fórmula:

$$h_w [kJ/kg] = c_{p\text{ água}} \times Tdb2$$

$$h_w [kJ/kg] = 4.1868 \times Tdb2$$

O declive de reta da equação anterior é 4.1874, ou seja é o valor de uma quilocaloria, que por definição é o calor permutado quando a temperatura de 1kg de água é elevada de 14,5°C para 15,5°C, a pressão constante. Este variável representa o calor específico desta substância que, apesar de não ter valor constante durante a sua fase líquida, pode ser aproximada para 4,1874

$\text{kJ/kg.K}$  sem se obter um erro significativo.

### Cooling and Dehumidification

**Point 1**

**First Input**

Tdb [C]

30

**Second Input**

☐ Wet Bulb Temp

☒ Relative Humidity

RH [%]

80

**Point 2**

**First Input**

Tdb [C]

14

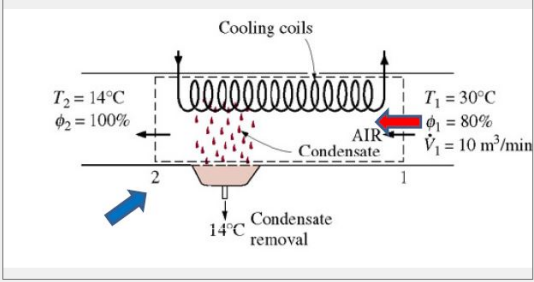
**Air Flow**

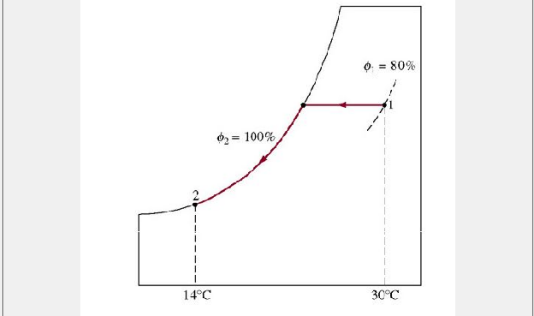
☐ Mass Flow Rate

☒ Volume Flow Rate

Volume Flow Rate [m3/s]

0.1667



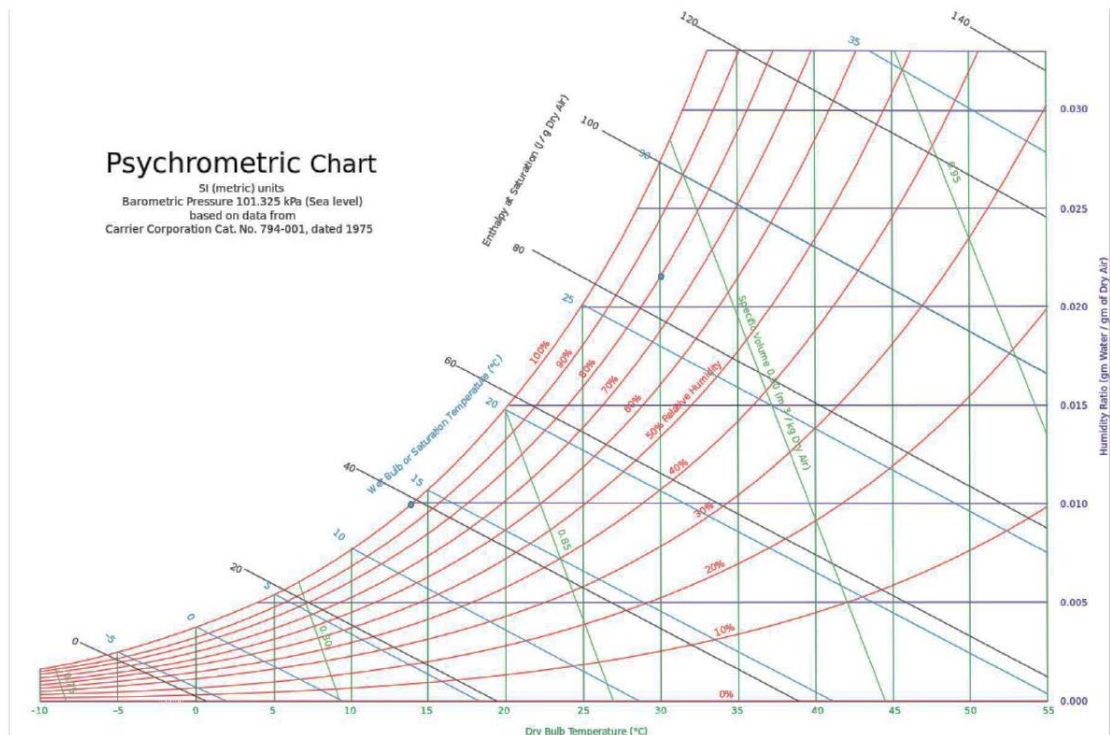


**Calculation**

[Back to menu](#)

Figura 10 - Janela de introdução de valores para a transformação de arrefecimento seguido de desumidificação.





Points Inputs					
Point 1			Point 2		
Tdb1 [°C]	30		Tdb2 [°C]	14	
Twb1 [°C]	27.13		Twb2 [°C]	14	
RH [%]	80.00		RH [%]	100.00	

AtmPress	101085.33 Pa
----------	--------------

Point 1	
Moisture Cont.	0.0216 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Moisture Cont.	21.6 g <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Enthalphy	85.2 kJ/kg <sub>dryair</sub>
Sp. Volume	0.889 m <sup>3</sup> /kg <sub>dryair</sub>
Dew. Point	25.9 °C

Point 2	
Moisture Cont.	0.0100 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Moisture Cont.	10.0 g <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Enthalphy	39.2 kJ/kg <sub>dryair</sub>
Sp. Volume	0.83 m <sup>3</sup> /kg <sub>dryair</sub>
Dew. Point	14.0 °C

Flow Rate Inputs	
Volume flow rate [m <sup>3</sup> /s]	0.1667

Cooling and Dehumidification	
Capacity [kW]	8.75
Mass flow rate [kg/s]	0.1876
Mass flow rate of condensing water [kg/s]	0.00218
Water entalphy at Temperature 2 [kJ/kg]	58.52
Moisture content at temp. 1 [kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub> ]	0.0216
Moisture content at temp. 2 [kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub> ]	0.0100

Figura 11 – Documento PDF criado pela aplicação referente ao arrefecimento seguido de desumidificação.



### 2.2.5. Mistura de dois caudais de ar (*Mixing*)

A mistura de dois caudais consiste na junção de dois fluxos de ar com o objetivo de se obter um caudal à saída com características intermédias dos dois caudais de entrada. Este processo é bastante utilizado em climatização e refrigeração, pois permite fazer a junção de ar recirculado com ar novo, obtendo assim uma poupança energética, uma vez que o ar recirculado tem propriedades bastante semelhantes ao ar que se pretende insuflar.

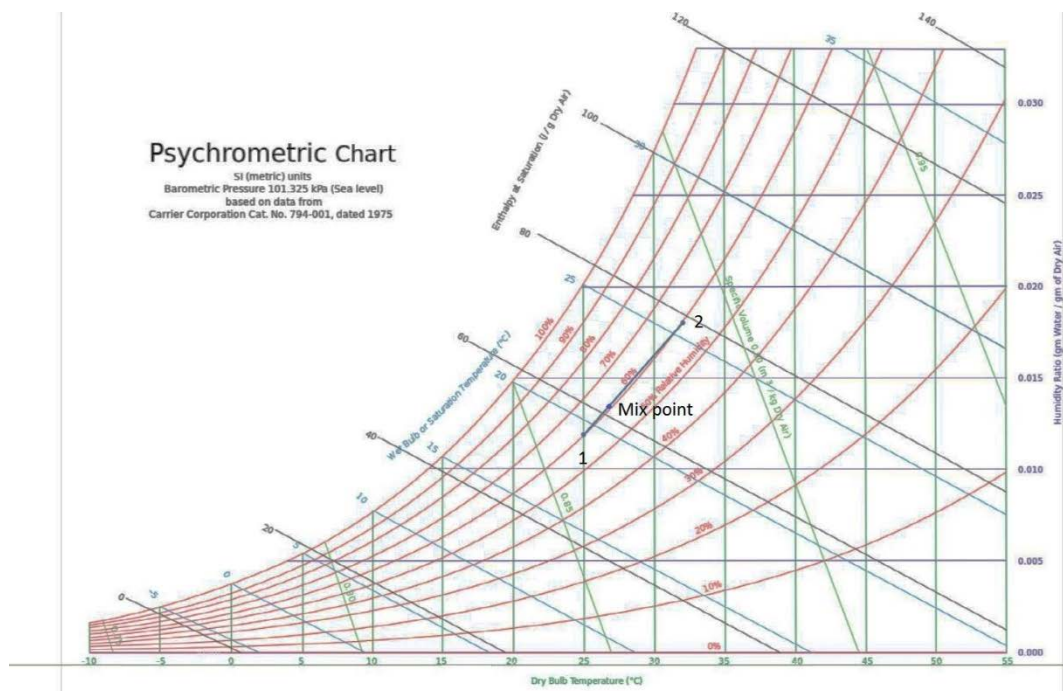
Neste caso particular, os dados de entrada necessários, tanto para o ponto inicial como para o ponto final, são Temperatura de Bolbo Seco, e Humidade Relativa ou Temperatura de Bolbo Húmido. Para além destes, o utilizador terá de introduzir os valores de caudais mássicos ou volúnicos referentes a cada ponto. Geralmente este processo é utilizado previamente a outra transformação, que por sua vez, tem como objetivo alterar as características do ar entre o ponto de mistura e o ponto de insuflação.

As imagens seguintes mostram a interface de introdução de valores e as tabelas que são apresentadas ao utilizador quando este clica no botão para criar o ficheiro PDF.

The screenshot shows a software window titled "Mixture" with a green header bar. The interface is divided into several sections:

- Point 1:**
  - First Input:** Tdb [C] with a value of 32.
  - Second Input:** Radio buttons for "Wet Bulb Temp" and "Relative Humidity" (selected). RH [%] with a value of 60.
- Point 2:**
  - First Input:** Tdb [C] with a value of 25.
  - Second Input:** Radio buttons for "Wet Bulb Temp" and "Relative Humidity" (selected). RH [%] with a value of 60.
- Air Flow:**
  - Radio buttons for "Mass Flow Rate" (selected) and "Volume Flow Rate".
  - Mass Flow Rate - Point 1 [kg/s] with a value of 1.
  - Mass Flow Rate - Point 2 [kg/s] with a value of 3.
- Diagram:** A schematic of two air streams (1 and 2) mixing in a "Mixing section" to produce a third stream (3). Labels include  $\omega_1, h_1$ ,  $\omega_2, h_2$ , and  $\omega_3, h_3$ .
- Psychrometric Chart:** A chart showing the mixing process. A line connects point 1 (at  $H_1, t_1$ ) and point 2 (at  $H_2, t_2$ ). Point 3 (at  $H_3, t_3$ ) lies on this line. The chart also shows saturation curves and other thermodynamic lines. Labels include  $\dot{m}_2 = 2 \times \dot{m}_1$ ,  $\dot{m}_1$ ,  $\dot{m}_2$ ,  $\dot{m}_3$ , and  $\dot{m}$ .
- Buttons:** A large "Calculation" button and a smaller "Back to menu" button.

Figura 12 - Janela de introdução de valores para mistura de caudais de ar.



Points Inputs					
Point 1			Point 2		
Tdb1 [°C]	32.00		Tdb2 [°C]	25.00	
Twb1 [°C]	26.79		Twb2 [°C]	19.50	
RH [%]	60.00		RH [%]	60.00	

AtmPress	101325.35 Pa
----------	--------------

Point 1	
Moisture Cont.	0.0180 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Moisture Cont.	18.0 g <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Enthalphy	78.2 kJ/kg <sub>dryair</sub>
Sp. Volume	0.890 m <sup>3</sup> /kg <sub>dryair</sub>
Dew. Point	23.0 °C

Point 2	
Moisture Cont.	0.0119 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Moisture Cont.	11.9 g <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Enthalphy	55.3 kJ/kg <sub>dryair</sub>
Sp. Volume	0.86 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Dew. Point	16.5 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>

Flow Rate Inputs	
Point 1 - Mass flow rate [kg/s]	1.00
Point 1 - Volume flow rate [m <sup>3</sup> /s]	0.89
Point 2 - Mass flow rate [kg/s]	3.00
Point 2 - Volume flow rate [m <sup>3</sup> /s]	2.58

Flow Rate Inputs	
Point 3	
Tdb3 [°C]	26.8 [°C]
Twb3 [°C]	21.58 [°C]
Moisture Cont.	0.0134 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Moisture Cont.	13.424 g <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
HR	63.04 %
Enthalphy	61.1 kJ/kg <sub>dryair</sub>
Sp. Volume	0.856 m <sup>3</sup> /kg <sub>dryair</sub>
Dew. Point	19.0 °C

Figura 13 - Documento PDF referente à mistura de dois caudais de ar.

### 2.2.6. Arrefecimento e desumidificação por meio de "Baterias húmidas" (*Dehumidification coil*)

O arrefecimento e desumidificação recorrendo a baterias “húmidas” é o processo mais utilizado a nível industrial. Aqui são aplicadas serpentinas cujas superfícies se encontram a uma temperatura inferior à do ponto de orvalho do ar, o que permite simultaneamente o seu arrefecimento e a condensação de algum do vapor de água que nele se encontra. Porém, nem todo o ar entra em contacto com as serpentinas, tendo uma temperatura à saída das baterias superior à temperatura da superfície das serpentinas e, simultaneamente, não se encontrando saturado.

Ao clicar no botão que permite os cálculos característicos deste processo, o utilizador é confrontado com a janela que se encontra na figura 12, na qual terá de introduzir duas propriedades termodinâmicas características dos dois pontos, que são a temperatura de bolbo seco, de introdução obrigatória, e a temperatura de bolbo húmido ou humidade relativa. Para além destes dois valores, é necessário inserir o valor do caudal mássico ou volúmico do ar que intervém neste processo.

**Dehumidification Coil**

**Point 1**

First Input  
Tdb [C]

Second Input  
☐ Wet Bulb Temp    ☒ Relative Humidity  
 RH [%]

**Point 2**

First Input  
Tdb [C]

Second Input  
☐ Wet Bulb Temp    ☒ Relative Humidity  
 RH [%]

**Air Flow**  
☒ Mass Flow Rate    ☐ Volume Flow Rate  
 Mass Flow Rate - Point 1 [kg/s]

$\omega_A$   
 $\omega_B$   
 $\omega_e$

$t_{adp}$     $t_O$     $t_B$     $t_A$

Calculation

Back to menu

Figura 14 - Janela de introdução de valores para arrefecimento e desumidificação por meio de uma “bateria húmida”

Depois de introduzidos todos os dados necessários, a aplicação cria um relatório com todos os valores relevantes, nomeadamente as propriedades termodinâmicas de cada ponto e o calor sensível, latente e total que as baterias terão de retirar ao ar para que o ponto final seja atingido.

O calor sensível é a energia calorífica necessária para a diminuição da temperatura de bolbo seco do ar e o calor latente é a energia necessária para a remoção da humidade. As potências respetivas são dadas pelas seguintes equações, (Santos, 2011):

$$\dot{Q}_{latente} [kW] = \dot{m}_{ar} \times (h_1 - h_M)$$

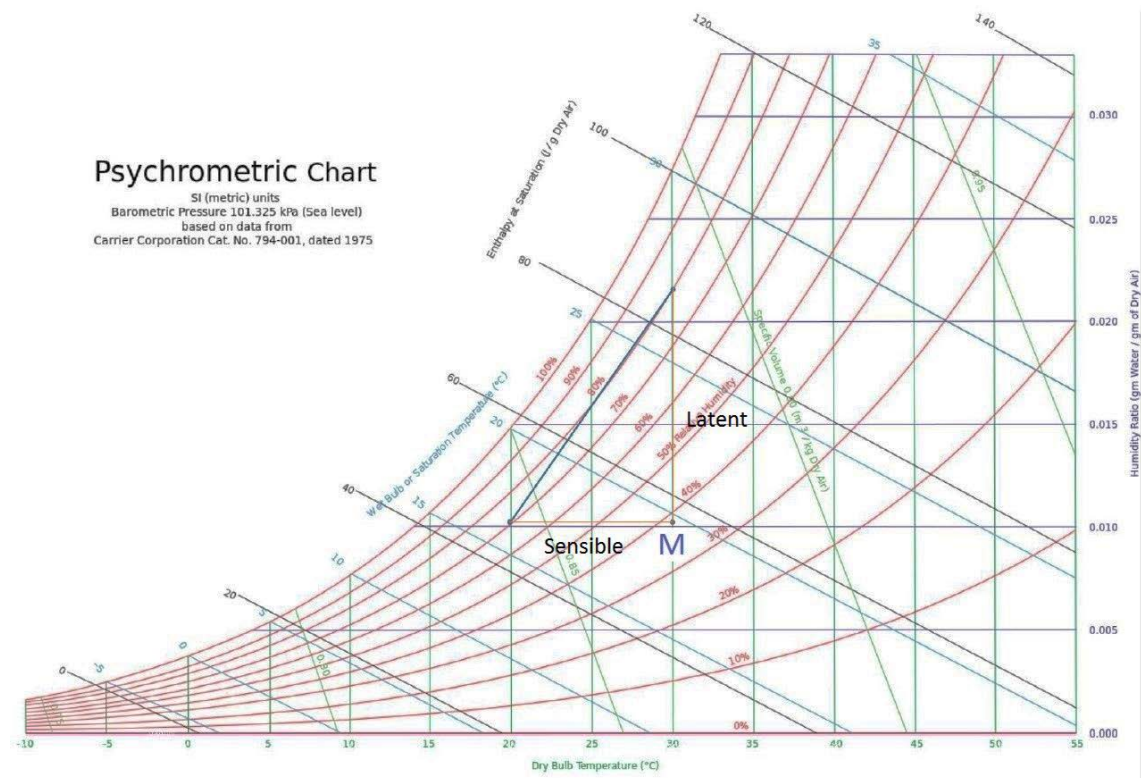
$$\dot{Q}_{sensivel} [kW] = \dot{m}_{ar} \times (h_M - h_2)$$

$$\dot{Q}_{total} [kW] = \dot{Q}_{latente} + \dot{Q}_{sensivel}$$

A entalpia do ponto M é determinada recorrendo à seguinte fórmula, (Santos, 2011):

$$h \left[ \frac{kJ}{kg_a} \right] = 1.005 \times Tdb1 + x_2 \times (1.93 \times Tdb1 + 2490)$$

É importante salientar que o ponto M tem valor idêntico de temperatura de bolbo seco ao ponto 1 e a sua humidade específica é igual à do ponto 2 (ver figura 13).



Points Inputs					
Point 1			Point 2		
Tdb1 [°C]	30		Tdb2 [°C]	20	
Twb1 [°C]	27.13		Twb2 [°C]	16.28	
RH [%]	80.00		RH [%]	70.00	

AtmPress	101325.35 Pa
----------	--------------

Point 1	
Moisture Cont.	0.0216 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Moisture Cont.	21.6 g <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Enthalpy	85.2 kJ/kg <sub>dryair</sub>
Sp. Volume	0.889 m <sup>3</sup> /kg <sub>dryair</sub>
Dew. Point	25.9 °C

Point 2	
Moisture Cont.	0.0102 kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Moisture Cont.	10.2 g <sub>vapor</sub> /kg <sub>dryair</sub>
Enthalpy	45.9 kJ/kg <sub>dryair</sub>
Sp. Volume	0.84 m <sup>3</sup> /kg <sub>dryair</sub>
Dew. Point	14.3 °C

Flow Rate Inputs	
Point 1 - Mass flow rate [kg/s]	0.25

Energy	
Total Energy [kW]	9.80
Volume flow rate [m <sup>3</sup> /s]	0.2222
Latent Heat [kW]	7.24
Sensible Heat [kW]	2.56

Figura 15 - Documento PDF criado pela aplicação para as transformações de arrefecimento e desumidificação por meio de uma “bateria húmida”

## 2.3. Fórmulas consideradas para o cálculo das propriedades psicrométricas

Como foi mostrado anteriormente, a aplicação desenvolvida calcula todas as propriedades termodinâmicas para os pontos relevantes de cada processo psicrométrico. Seguidamente serão explicadas as fórmulas que foram utilizadas para obter as propriedades, tendo em conta os dados de entrada introduzidos.

### 2.3.1. Introdução de Temperatura de Bolbo Seco e Temperatura de Bolbo Húmido

#### 2.3.1.1. Cálculo da pressão parcial de vapor e da pressão de saturação

Quando a temperatura de bolbo seco e a temperatura de bolbo húmido são introduzidas, os primeiros valores que a aplicação calcula são os da pressão parcial de vapor de água e saturação. As fórmulas utilizadas foram as seguintes, (Vaisala, 2013):

$$p_{v|Tdb}[kPa] = 220640 \times 100 \times e^{\frac{Tc}{Tbs}} \times (c1 \times v_1 + c2 \times v_1^{1.5} + c3 \times v_1^3 + c4 \times v_1^{3.5} + c5 \times v_1^4 + c6 \times v_1^{7.5})$$

$$p_{s|Twb}[kPa] = 220640 \times 100 \times e^{\frac{Tc}{Tbh}} \times (c1 \times v_2 + c2 \times v_2^{1.5} + c3 \times v_2^3 + c4 \times v_2^{3.5} + c5 \times v_2^4 + c6 \times v_2^{7.5})$$

Onde:

$$c1 = -7,85951783$$

$$c2 = 1,84408259$$

$$c3 = -11,7866497$$

$$c4 = 22,6807411$$

$$c5 = -15,9618719$$

$$c6 = 1,80122502$$

$$Tc [K] = 647.096$$

$$Tdb [K] = Tdb [^{\circ}C] + 273.15$$

$$Twb [K] = Twb [^{\circ}C] + 273.15$$

$$v_2 = 1 - \left( \frac{Tbh[K]}{Tc[K]} \right)$$

$$v_1 = 1 - \left( \frac{Tbs[K]}{Tc[K]} \right)$$

### 2.3.1.2. Cálculo da Humidade Relativa

Com a pressão de saturação e a pressão parcial de vapor de água já calculadas é possível determinar o valor da Humidade Relativa:

$$HR [\%] = \frac{p_v(T)}{p_s(T)} \times 100$$

### 2.3.1.3. Cálculo da Humidade Específica

Seguidamente, sabendo o valor da humidade relativa e pressão de saturação, a aplicação calcula o valor de humidade específica através da seguinte equação:

$$x [kg_v/kg_a] = 0.622 \times \frac{HR \times p_s}{p_{atm} - HR \times p_s}$$

### 2.3.1.4. Cálculo da Entalpia

Tendo os valores anteriores sido calculados, é possível determinar a entalpia através da seguinte fórmula:

$$h \left[ \frac{kJ}{kg_a} \right] = 1.005 \times Tdb + x \times (1.93 \times Tdb + 2490)$$

### 2.3.1.5. Cálculo do Volume Específico

Seguidamente a aplicação calcula o volume específico através da seguinte equação de estado dos gases perfeitos:

$$v \left[ \frac{m^3}{kg_a} \right] = \frac{287.069 \times (Tdb + 273.15)}{p_{atm} - (RH/100) \times p_s}$$

### 2.3.1.6. Cálculo da Temperatura de ponto de orvalho

Finalmente, é calculada a temperatura de ponto de orvalho através das seguintes equações, (Vaisala, 2013):

$$Tdp [^{\circ}C] = \frac{c \times y_m}{b - y_m}$$

Onde:

$$b = 17,368$$

$$c = 238,88$$

$$y_m = \ln \left( \frac{RH}{100} \times e^{\left( b - \frac{Tdb}{d} \right) \times \left( \frac{Tdb}{c + Tdb} \right)} \right)$$



### 2.3.2. Introdução da Temperatura de Bolbo Seco e Humidade Relativa

#### 2.3.2.1. Cálculo da temperatura de bolbo húmido

Quando os valores de temperatura de bolbo seco e de humidade relativa são introduzidos, o aplicativo informático vai determinar o valor da temperatura de bolbo húmido através da seguinte fórmula (Vaisala, 2013):

$$\begin{aligned} T_{wb} [^{\circ}C] = T_{db} \times \operatorname{atan}\left(0,151977 \times (HR + 8,313659)^{\frac{1}{2}}\right) + \operatorname{atan}(T_{bd} + RH) + \\ + \operatorname{atan}(RH - 1,676331) + (0,00391838 \times RH)^{\frac{3}{2}} \times \\ \times \operatorname{atan}(0,023101 \times RH) - 4,686035 \end{aligned}$$

Sabendo-se a temperatura de bolbo seco e a temperatura de bolbo húmido é então possível calcular as restantes propriedades psicrométricas através das fórmulas apresentadas na secção 2.3.1, à exceção da fórmula referente ao cálculo da humidade relativa, que foi introduzida pelo utilizador.

#### 2.3.3. Determinação das propriedades termodinâmicas para o ponto resultante da mistura de dois caudais.

##### 2.3.3.1. Cálculo da temperatura de bolbo húmido através do valor de entalpia

Sabendo que no diagrama psicrométrico, as linhas de entalpia constante são praticamente paralelas às linhas de temperatura de bolbo húmido constante, foi possível relacionar as duas propriedades, obtendo um erro máximo não superior a 2.2%. Para tal, foram inseridos no *Excel* dez pontos que relacionam ambas as propriedades e achou-se a equação que melhor se adapta à relação entre as duas. Com a finalidade de se obter o menor erro possível de aproximação entre a equação e os valores retirados, optou-se por uma equação polinomial de terceiro grau e a aproximação máxima que o *Excel* é capaz de obter, que é de 12 casas decimais.

A equação e o erro obtidos podem ser consultados na figura 16:

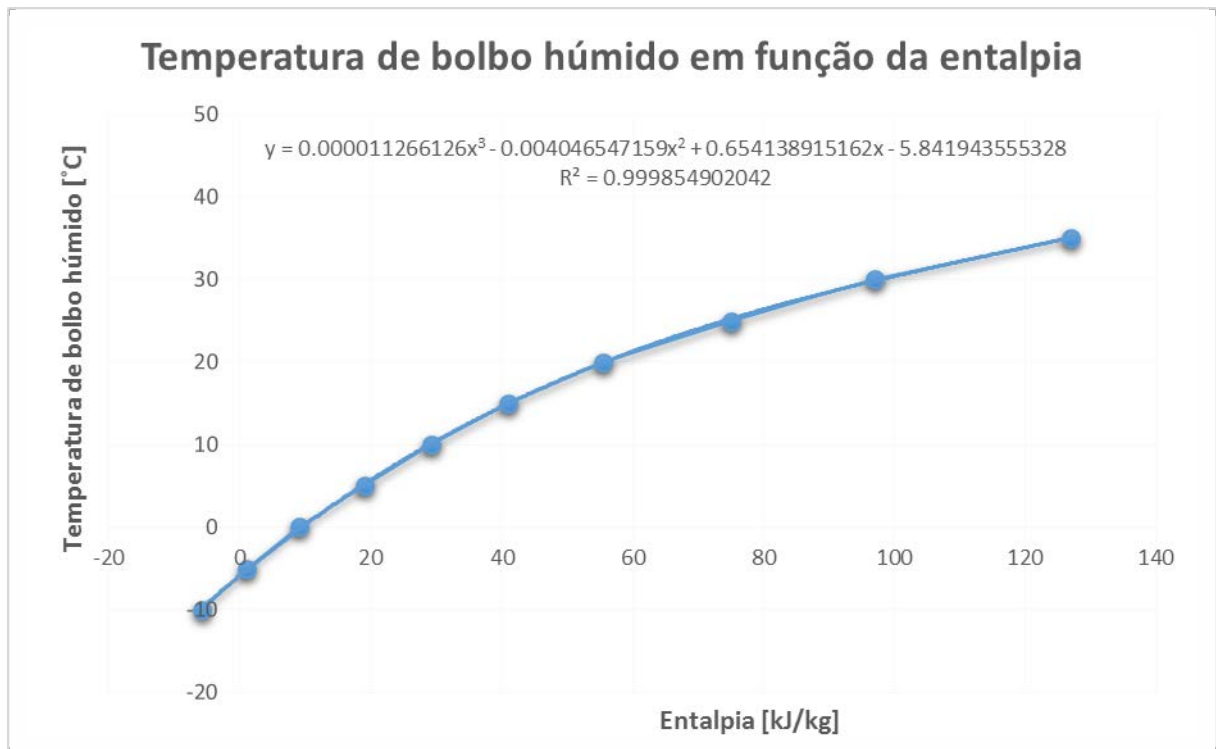


Figura 16 - Gráfico da temperatura de bolbo húmido função da entalpia do ar.

A equação que permite calcular a temperatura de bolbo húmido em relação à entalpia é então:

$$T_{wb} [^{\circ}\text{C}] = 0,000011266126 \times h^3 + 0,004046547159 \times h^2 + 0,654138915162 \times h - 5,841943555328$$

Observando o diagrama psicrométrico representado na figura 17, conclui-se que o erro por se considerar as duas retas proporcionais é máximo para valores máximos de temperatura de bolbo seco e valores mínimos de humidade relativa, uma vez que o coeficiente que quantifica o desvio do valor da entalpia aumenta com a temperatura de bolbo seco e, para a mesma temperatura o valor da entalpia diminui com o decréscimo do valor da humidade relativa. Sendo assim, poder-se-á concluir que o erro percentual máximo ocorre quando a temperatura de bolbo seco é 55°C e a humidade relativa é igual a 0%. Para este ponto, como se pode confirmar no diagrama psicrométrico representado na figura 17, o desvio de entalpia é aproximadamente igual a -1,2 kJ/kg e a entalpia não corrigida igual a 56 kJ/kg. Assim, a entalpia corrigida é igual a 54,8 kJ/kg, sendo o erro percentual da aproximação realizada igual a 2,2%, como se pode observar na equação seguinte:

$$\text{Erro percentual máximo} = \frac{|54.8 - 56|}{54.8} \times 100 = 2,2\%$$

No entanto, na realidade este erro vai ser consideravelmente inferior, uma vez que em casos reais os pontos psicrométricos considerados nunca se encontram num estado tão extremo de humidade relativa mínima e temperatura de bolbo seco máxima. Por exemplo, considerando uma caso real onde no exterior a temperatura de bolbo seco é igual a 40°C e a humidade relativa é igual a 40% o erro será aproximadamente 1%.

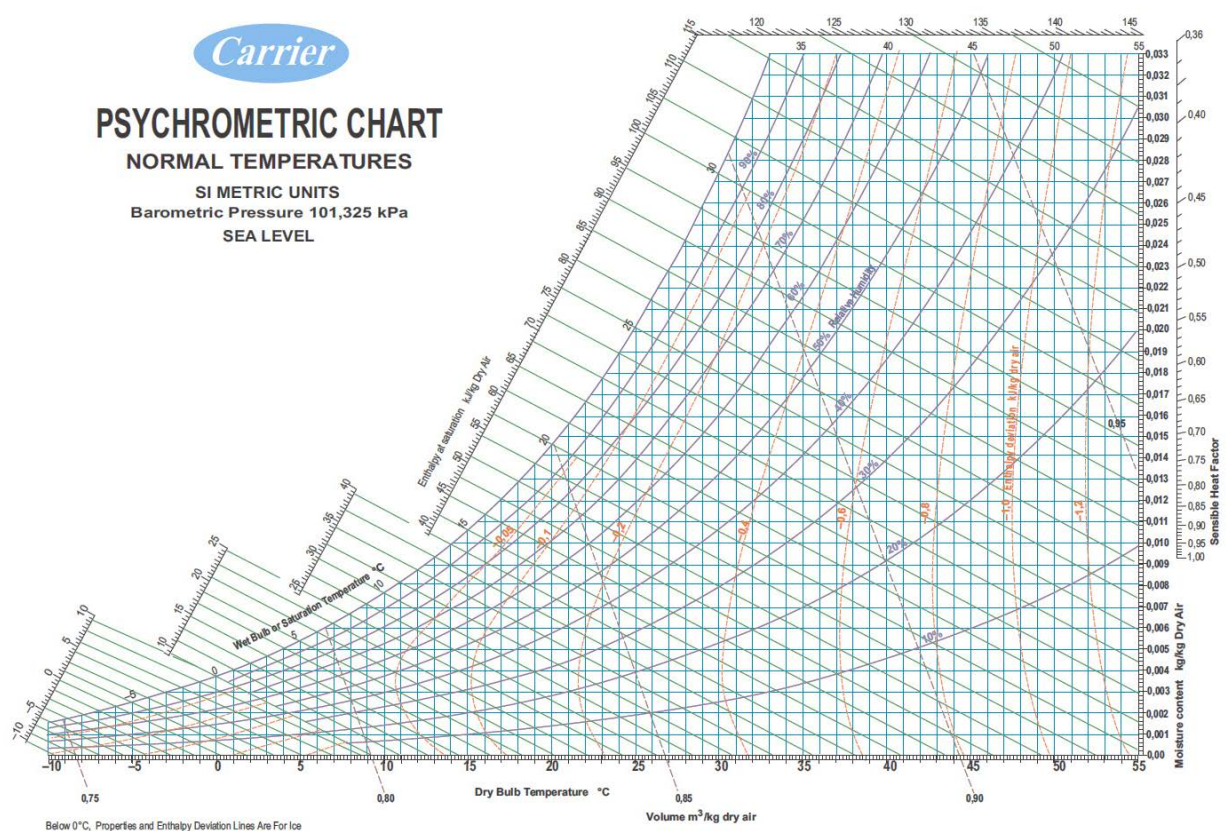


Figura 17 - Diagrama psicrométrico onde estão representadas as linhas de desvio do valor de entalpia.

### 2.3.3.2. Cálculo da temperatura de bolbo seco

O cálculo da temperatura de bolbo seco foi realizado recorrendo à linguagem de programação “*Visual Basic*”, utilizando um ciclo “*while*” com incremento de 0,05 °C. De forma simplificada, o programa determina a equação da reta definida pelos pontos inicial e final da mistura, através da fórmula da inclinação de reta (m) e da ordenada de abcissa igual a zero (b).

Seguidamente o programa vai determinar qual o ponto com menor temperatura de bolbo seco para que seja possível iniciar o ciclo “*while*” neste ponto. Com este objetivo, as variáveis iniciais da incrementação “Tdbinc” e “hinc3” são definidas, sendo elas o valor mínimo da temperatura de bolbo seco e o seu valor de entalpia. Ou seja:

$$Tdbinc = \min(Tdb1, Tdb2)$$

$$hinc3 = h(Tdbinc)$$

No ciclo “*while*”, a entalpia de cada ponto será calculada através do valor da humidade específica, que tem valor igual à ordenada da reta calculada para o valor da temperatura de incrementação.

O ciclo vai ser realizado até que a entalpia calculada pela fórmula relativa ao processo de mistura de ar seja imediatamente inferior ao valor da entalpia calculada em cada incrementação. Quando este for interrompido, a temperatura de bolbo seco determinada pela incrementação terá valor igual ao da mistura, sendo este o que se pretendia determinar, com um erro absoluto não superior a 0,05°C. Na figura 18 estão representadas as condições explicadas anteriormente.

```
x1 = ThisWorkbook.Sheets("Mixture").Range("C13").Value
x2 = ThisWorkbook.Sheets("Mixture").Range("G13").Value
Tdb1 = ThisWorkbook.Sheets("Mixture").Range("C5").Value
Tdb2 = ThisWorkbook.Sheets("Mixture").Range("H5").Value

m3 = m1 + m2
h3 = ((m1 * h1) + (m2 * h2)) / (m3)

m = (x2 - x1) / (Tdb2 - Tdb1)
b = -(m * Tdb1) + x1

Tdbinc = ThisWorkbook.Sheets("Mixture").Range("v26").Value
hinc3 = ThisWorkbook.Sheets("Mixture").Range("v25").Value

Do While h3 > hinc3
    Tdbinc = Tdbinc + 0.05
    xinc3 = m * Tdbinc + b
    hinc3 = 1.005 * Tdbinc + xinc3 * (1.93 * Tdbinc + 2490)
Loop

Tdb3 = Tdbinc
x3 = (h3 - (1.005 * Tdb3)) / (1.93 * Tdb3 + 2490)
ThisWorkbook.Sheets("Mixture").Range("E40").Value = Tdb3
ThisWorkbook.Sheets("Mixture").Range("E45").Value = h3
```

Figura 18 - Código de programação criado com o objetivo de se determinar a entalpia do ponto pretendido.



### 3. DIMENSIONAMENTO DE VÁLVULAS DE SEGURANÇA SEGUNDO A NORMA BS-EN13136:2001

Durante o estágio foi proposta a realização de um programa em *Excel VBA* que permitisse o dimensionamento de válvulas de segurança segundo a Norma Europeia EN13136. Esta norma permite o seguinte:

- Cálculo do caudal mássico para válvulas de segurança empregues em instalações de refrigeração;
- Cálculo da capacidade de descarga da válvula, incluindo toda a informação necessária para a determinação das dimensões mínimas deste equipamento;
- Quantificação das variáveis que conduzem a um excesso de pressão no sistema;
- Cálculo da perda de pressão nas tubagens a jusante e a montante da válvula de segurança, incluindo o fornecimento da informação necessária para a sua obtenção.

#### 3.1. Resumo dos cálculos especificados pela norma BS-EN13136:2001

##### 3.1.1. Capacidade de descarga mínima da válvula de segurança

Os primeiros cálculos contidos nesta norma dizem respeito à capacidade de descarga mínima da válvula de segurança. Os fatores que influenciam esta capacidade são:

- Excessiva pressão causada por fontes externas e internas de calor;
- Excessiva pressão causada por compressores;
- Excessiva pressão causada pela expansão do líquido armazenado no depósito.

A soma destas variáveis vai ser igual ao caudal mínimo de descarga que a válvula de segurança terá de assegurar.

As seguintes fórmulas possibilitam determinar o caudal mínimo requerido para cada um destes parâmetros, (BS-EN13136, 2001).

$$\dot{Q}_{md \mid fontes \text{ externas de calor}} [kg/h] = \frac{3600 \times \varphi \times A_{superficie}}{h_{vap}}$$

Onde:

$\varphi = 10 \text{ kW/m}^2$  - Ganho de calor pelo depósito pressurizado por metro quadrado de superfície, (valor padrão usado na norma BS13136:2001).

$h_{vap} [\text{kJ/kg}]$  - Entalpia de vaporização do fluido frigorigéneo à temperatura que se encontra no depósito.

$A_{superfície} [\text{m}^2] = 2 \times \pi \times \frac{d}{2} \times L + 2 \times \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2$  - Área da superfície do depósito, considerando um depósito cilíndrico.

$L [\text{m}]$  – Comprimento do depósito.

$d [\text{m}]$  – Diâmetro do depósito.

De acordo com a norma, o valor do ganho de calor pelo depósito ( $\varphi$ ) poderá ser reduzido se a espessura do isolamento for superior ou igual a 40 milímetros, e se a sua classificação segundo a norma de resistência a incêndios EN 13501-1 for melhor ou igual a classe C. Se estes dois fatores forem cumpridos, o novo valor para o ganho de calor é dado pela seguinte equação, (BS-EN13136, 2001):

$$\varphi_{red} [\text{kW/m}^2] = \varphi \times \frac{0,04}{s}$$

Onde:

$s [\text{m}]$  - Espessura do isolamento

$$\dot{Q}_{md} | \text{fontes internas de calor} [\text{kg/h}] = 3600 \times \frac{Q_h}{h_{vap}}$$

Onde:

$h_{vap} [\text{kJ/kg}]$  - Entalpia de vaporização do fluido frigorigéneo à temperatura que se encontra no depósito

$Q_h [\text{kW}]$  – Potência calorífica devido a fontes internas



$$\dot{Q}_{md | compressores} [kg/h] = 60 \times V \times n \times \rho_{10} \times \eta_v$$

Onde:

$V [m^3]$  - Deslocamento teórico do compressor.

$\rho_{10} [kg/m^3]$  - Densidade de vapor do fluido frigorigéneo para a pressão de saturação a 10°C

$\eta_v$  - Rendimento volumétrico do compressor.

$n [min^{-1}]$  – Frequência de rotação do compressor.

Como geralmente os fabricantes de compressores fornecem o deslocamento volumétrico horário destes equipamentos a variável anterior pode ser calculada através da seguinte fórmula, (BS-EN13136, 2001):

$$\dot{Q}_{md | compressores} [kg/h] = VH \times \rho_{10}$$

Onde:

$VH [m^3/h]$  – Deslocamento volumétrico horário do compressor.

### 3.1.2. Expansão do líquido

Segundo a norma, a área útil da válvula  $[A \times K_{dr}]$  deverá ser igual ou superior a 0,02 metros quadrados por litro de líquido armazenado no depósito, como forma de proteção contra pressão excessiva causada pela expansão do líquido. Além disto, é aconselhado que quando praticável, a válvula de segurança liberte o fluido para o lado de menor pressão e que se encontre totalmente aberta para uma pressão dada pela expressão  $[1.1 \times p_{set} + p_{atm}]$ . Analisando estes requisitos conclui-se que o dimensionamento da válvula de segurança tem que obedecer aos seguintes princípios:

$$EA [m^2] \geq 0.02 \times \frac{V_{\text{líquido no depósito}}}{1000}$$

Onde:

$EA [m^2] = A \times K_{dr}$  - Área útil da válvula

$V_{\text{líquido no depósito}} [m^3]$  - Volume de líquido presente no depósito

$K_{dr} = K_d \times 0,9$  - Coeficiente de descarga reduzida da válvula

$K_d$  - Coeficiente de descarga da válvula (dado pelo fabricante)

$$p_0 [bar] = 1,1 \times p_{set} + p_{atm}$$

Onde:

$p_0 [bar]$  - Pressão de alívio da válvula corrigida, ou seja pressão para a qual a válvula terá de estar totalmente aberta.

$p_{set} [bar]$  - Pressão predeterminada ao qual a válvula começa a abrir

$p_{atm} [bar]$  - Pressão atmosférica, considerada a 1,01325 bar (nível do mar)

De seguida é necessário determinar se o caudal é crítico ou subcrítico. Diz-se que o caudal ou velocidade de vapor que passa através de um orifício, como por exemplo uma válvula de segurança, é subcrítico quando o seu valor aumenta à medida que a pressão à saída diminui. Quando o valor de caudal crítico é atingido, o decréscimo da pressão à saída não irá resultar num aumento de caudal.

O caudal crítico ocorre quando, (BS-EN13136, 2001):

$$\frac{p_b}{p_0} \leq \left[ \frac{2}{K+1} \right]^{K/(K-1)}$$

Por sua vez, o caudal subcrítico ocorre quando, (BS-EN13136, 2001):

$$\frac{p_b}{p_0} > \left[ \frac{2}{K+1} \right]^{K/(K-1)}$$

Onde:

$p_b$  [bar] - Pressão absoluta depois da válvula de segurança, geralmente pressão atmosférica.

$K$  - Expoente isentrópico característico do fluido frigorigéneo

### 3.1.3. Cálculo do caudal mássico de fluido frigorigéneo da válvula de pressão

O caudal mássico, tanto para um fluxo subcrítico como para um fluxo crítico, é dado pela seguinte fórmula, (BS-EN13136, 2001):

$$Q_m [kg/h] = 0,2883 \times C \times A \times K_{dr} \times K_b \times \frac{p_0}{v_0}$$

Onde:

$C$  - Variável de correção função do expoente isentrópico do fluido frigorigéneo.

$K_{dr} = K_d \times 0,9$  - Coeficiente de descarga reduzida.

$K_b$  - Variável de correção para o caudal subcrítico.

$p_0$  [bar] - Pressão de alívio da válvula corrigida segundo a norma.

$v_0$  [m<sup>3</sup>/kg] - Volume específico de vapor ou líquido.

Esta fórmula permite calcular o caudal mássico que passa através de uma determinada válvula de segurança que, segundo a norma, terá de ser maior que a soma do caudal mínimo necessário, calculado anteriormente.

Analisando a expressão matemática anterior conclui-se que o valor do caudal mássico depende do expoente isentrópico do fluido frigorigéneo ( $k$ ), do valor de  $C$ . Estas variáveis podem ser facilmente determinadas consultando as tabelas A.1, A.2 e A.3 presentes na EN13136 (2001).

Por sua vez, o valor de  $K_b$ , que tem como função corrigir o fluxo para condições de caudal subcrítico, depende de  $k$  e  $p_b/p_0$  e obtém-se através das tabelas referidas no parágrafo anterior. No entanto, como em casos práticos  $p_0$  é sempre superior ao dobro de  $p_b$ , conclui-se que o valor de  $K_b$  é sempre igual a 1.

#### **3.1.4. Cálculo da área mínima da válvula de segurança, admissível pela norma.**

A área atravessada pelo caudal é calculada a partir do valor da descarga mínima requerida, que é igual a:

$$A_c [mm^2] = \frac{Q_{md}}{0,2883 \times C \times K_{dr} \times K_b \times \frac{p_0}{v_0}}$$

Este valor vai ser necessário para calcular a perda de carga no troço a jusante da válvula de segurança.

#### **3.1.5. Cálculo das perdas de carga a jusante e a montante da válvula de segurança**

Segundo a norma EN13136, de forma a assegurar um correto funcionamento da válvula de segurança, as perdas de carga para a capacidade máxima [ $p_0 = 1,1 \times p_{set} + 1$ ] desta não deverão exceder:

- Os valores fixados pelo fabricante da válvula;
- 3% da pressão máxima a jusante da válvula;
- 10% da pressão máxima a montante da válvula, para dispositivos de segurança “*back pressure dependent*”;
- 20% da pressão máxima a montante da válvula, para dispositivos de segurança “*back pressure independent*”;

Adicionalmente, a velocidade a montante da válvula não deverá atingir a velocidade crítica (velocidade sónica), sendo este valor calculado através da seguinte fórmula, (BS-EN13136, 2001):

$$u_{sónica} [m/s] = \sqrt{k \times p_1 \times v_0}$$

$u_{sónica}$  – Velocidade sónica na linha a jusante da válvula de segurança.

$v_0 [m^3/kg]$  - Volume específico de vapor ou líquido.

$p_2 [bar]$  - Pressão à saída da válvula de segurança

De forma a determinar as perdas de carga em cada componente, o documento normativo apresenta duas alternativas de cálculo, sendo a primeira através do uso de valores  $K_{vs}$ , constante igual ao caudal de água que atravessa o dispositivo produzindo uma pressão diferencial de 1 bar, e a segunda por  $\xi$  (coeficiente de perdas de carga).

O cálculo usando valores de  $K_{vs}$  é dado pela seguinte fórmula:

$$\Delta_p [bar] = v_o \times \left[ \frac{Q_m}{K_{vs}} \right] \times 10^3$$

No entanto, como a norma disponibiliza em anexo uma tabela com os valores de  $\xi$ , o cálculo torna-se mais simples quando se recorre à determinação das perdas de carga através deste coeficiente. Esta tabela pode ser consultada na tabela 1 e a fórmula que permite calcular as perdas de carga está representada em seguida:

$$\Delta_p [bar] = 0,3858 \times \xi \times v_o \times \left[ \frac{Q_m}{K_{vs}} \right]^2$$

O valor total do coeficiente de perdas de carga ( $\xi$ ) é igual ao somatório dos valores deste coeficiente para cada componente ( $\xi_n$ ).

Se o fabricante de dispositivos, como por exemplo válvulas de segurança, fornecer apenas o valor de  $K_{vs}$ , o valor do coeficiente da perda de carga pode ser calculado através da seguinte expressão matemática.

$$\xi = 2,592 \times \left[ \frac{A_R}{k_{vs}} \right]^2 \times 10^{-3}$$

Por outro lado, se o valor do coeficiente estiver relacionado com o diâmetro nominal ( $\xi_{DN}$ ), este pode ser facilmente convertido para o diâmetro interno através da seguinte equação:

$$\xi = \left[ \frac{d_R}{DN} \right]^4 \times \xi_{DN}$$

Onde:

$d_R$  [mm] – Diâmetro interno da tubagem

$DN$  - Dimensão nominal (EN ISO 6708:1995)

$\xi_{DN}$  – Coeficiente de perda de carga relativo a DN.

$\xi$  – Coeficiente de perda de carga

De forma simplificada, para a instalação estar de acordo com a norma, as seguintes condições terão de ser cumpridas:

$$\Delta p_{in} [\text{bar}] \leq 0,03 \times p_0$$

$$\Delta p_{out} [\text{bar}] \leq 0,1 \times p_0 \text{ (Para válvulas do tipo “back pressure dependent”)}$$

$$\Delta p_{out} [\text{bar}] \leq 0,2 \times p_0 \text{ (Para válvulas do tipo “back pressure independent”)}$$

Onde:

$p_0$  [bar] =  $1,1 \times p_{set} + 1$  - Pressão de alívio da válvula corrigida segundo a norma

$p_{set}$  [bar] - Pressão predeterminada à qual a válvula começa a abrir

$\Delta p_{in}$  [bar] - Perda de pressão entre a saída do depósito e a válvula de segurança

$\Delta p_{out}$  [bar] - Perda de pressão na linha posterior à válvula de segurança

Calculados todos os valores anteriores, é então possível determinar as perdas de carga através das seguintes fórmulas:

$$\Delta p_{in} [bar] = 0,032 \times \left( \frac{A}{A_{in}} \times C \times Kdr \times Kb \right)^2 \times \xi \times p_0$$

Onde:

$A [m^2]$  - Área transversal da válvula de segurança

$A_{in} [m^2]$  - Área transversal interior do tubo

$$p1 [bar] = \sqrt{0,064 \times \xi \times \left[ \frac{A_c}{A_{out}} \times C \times Kdr \times Kb \times p_0 \right]^2 + p_2^2}$$

$$\Delta p_{out} [bar] = p1 - p2$$

Onde:




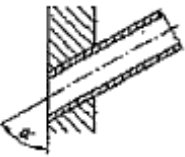
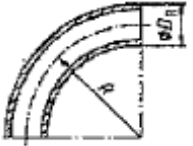

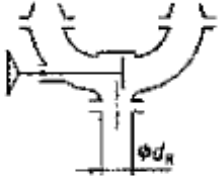
$p2 [bar]$  - Pressão à saída da linha, pressão atmosférica

$p1 [bar]$  - Pressão à saída da válvula de segurança

$A_c [m^2]$  - Área atravessada pelo caudal calculada

$A_{out} [m^2]$  - Área transversal interior do tubo

Table A.4 - Pressure loss coefficients of a single component  $\zeta_n$ 

Pipe elements		Flush connection	Very sharp edged Broken edge $\zeta_n = 0,5$ $\zeta_n = 0,25$
		Inserted connection	Very sharp edged Broken edge $\zeta_n = 1$ $\zeta_n = 0,56$
		Flared connection	According to the radius: between $\zeta_n = 0,005$ and $\zeta_n = 0,06$ normally $\zeta_n = 0,05$ is used
		Angled flush connection	$\zeta_n = 0,5 + 0,3 \cos \alpha + 0,2 \cos^2 \alpha$
		Pipe bend 90°	$R = 2D_R$ $\zeta_n = 0,3$ $R = 3D_R$ $\zeta_n = 0,25$ $R = 4D_R$ $\zeta_n = 0,23$ $R = 5D_R$ $\zeta_n = 0,18$
Pipes		Straight pipe	$\zeta_n = \lambda \times \frac{L}{d_R}$ Steel pipe $\lambda = 0,02$
Valves		Valves and changeover valves	$\zeta = 2,592 \times \left[ \frac{A_R}{K_{v_n}} \right]^2 \times 10^{-3}$ $A_R = \frac{\pi \times d_R^2}{4}$ $K_{v_n}$ or $\zeta$ shall be indicated by the manufacturer.

NOTE The values for  $\zeta_n$  given in the table are generally accepted and used values. Slightly different values can be used providing their selection can be justified, e.g. by published papers.

Tabela 1 - Coeficientes de perda de pressão para diferentes elementos (BS EN13136:2001).



### 3.2. Aplicação informática

A aplicação desenvolvida durante o estágio permite a seleção de entre os diferentes modelos de válvulas de segurança do tipo “*back pressure dependent*” fornecidas pela empresa “HERL” à “J&E Hall”, pois aquele é o fornecedor exclusivo deste tipo de dispositivos. O fluido frigorigéneo a considerar será somente o amoníaco, dado que a empresa apenas utiliza estas válvulas para sistemas de amoníaco.

**BS EN 13136 - Pressure relief devices and their associated**

**General**

Refrigerant: Ammonia

Pipe diameter (upstream) [mm]:

Pipe diameter (downstream) [mm]:

**Vessel**

Vessel length [m]:

Vessel diameter [m]:

External surface area [m<sup>2</sup>]:

Temperature [°C]:

Internal heat production [kW]:

Volume of the trapped liquid in the vessel [L]: [Help](#)

Isolation thickness of the vessel [mm]:

**Compressor**

Compressor displacement [m<sup>3</sup>/hr]:

**Relief Valve**

Kdr: 0.33

Pset [bar]:

Area [mm]: 1256.63704

Diameter of the relief valve [mm]: 40

**T23VA DNE 50**

Manufacture	HERL
Model	T23VA DNE 50
DNE	50
DNA	65
L [mm]	125
H [mm]	282
d0 [mm]	40
Outflow-coefficient	0.33
PN 1 [bar]	25
PN 2 [bar]	40

Pression loss in upstream line:

Pression loss in downstream line:

**CALCULATE**

**Print Report**

Figura 19 - Interface de introdução dos valores de entrada da aplicação.

Na figura 19 está representada a janela de entrada quando o programa é iniciado. A interface de introdução de dados é dividida em quatro partes, sendo a primeira de carácter geral, onde são introduzidos os valores de diâmetro da tubagem a montante e a jusante da válvula de segurança. A segunda categoria é referente ao depósito, sendo introduzidos os valores de comprimento e diâmetro, a temperatura do fluido, a espessura do isolamento e a produção interna de calor, como por exemplo através de resistências elétricas. Ainda nesta categoria, é também necessário introduzir o volume de líquido presente no depósito, sendo possível a sua determinação numa folha *Excel* criada para o efeito, a qual pode ser acedida quando se clica no botão de ajuda (*Help*). Por fim, deverão introduzir-se as características do compressor e da válvula de segurança.

Para determinar o volume de líquido presente no depósito o programa baseia-se na tabela contida em Stoecker (1998), conhecido que esteja o nível de líquido no depósito. Para tal é

necessário calcular o coeficiente entre o nível de líquido e o diâmetro, sendo este valor representado por  $F_{ht}$ . Posteriormente, tem de se retirar o valor de  $F_{vol}$  correspondente ao coeficiente anteriormente calculado que, por sua vez, vai ser multiplicado pelo volume total do depósito, calculando-se assim o volume de líquido presente neste. Na folha de cálculo referida anteriormente o utilizador terá de colocar os valores de diâmetro, comprimento e o nível de líquido, de forma a possibilitar o cálculo do respetivo volume de líquido.

Height $F_{ht}$	Volume $F_{vol}$	Height $F_{ht}$	Volume $F_{vol}$	Height $F_{ht}$	Volume $F_{vol}$	Height $F_{ht}$	Volume $F_{vol}$
0.01	0.0017	0.26	0.207	0.51	0.513	0.76	0.815
0.02	0.0048	0.27	0.218	0.52	0.525	0.77	0.826
0.03	0.0087	0.28	0.229	0.53	0.538	0.78	0.837
0.04	0.0134	0.29	0.241	0.54	0.551	0.79	0.847
0.05	0.0187	0.30	0.252	0.55	0.564	0.80	0.858
0.06	0.0245	0.31	0.264	0.56	0.576	0.81	0.868
0.07	0.0308	0.32	0.276	0.57	0.588	0.82	0.878
0.08	0.0375	0.33	0.288	0.58	0.601	0.83	0.887
0.09	0.0446	0.34	0.300	0.59	0.614	0.84	0.897
0.10	0.0520	0.35	0.312	0.60	0.626	0.85	0.906
0.11	0.0599	0.36	0.324	0.61	0.639	0.86	0.915
0.12	0.0680	0.37	0.336	0.62	0.651	0.87	0.924
0.13	0.0764	0.38	0.349	0.63	0.664	0.88	0.932
0.14	0.0851	0.39	0.361	0.64	0.676	0.89	0.940
0.15	0.0941	0.40	0.374	0.65	0.688	0.90	0.948
0.16	0.103	0.41	0.386	0.66	0.700	0.91	0.955
0.17	0.113	0.42	0.399	0.67	0.712	0.92	0.963
0.18	0.122	0.43	0.411	0.68	0.724	0.93	0.969
0.19	0.132	0.44	0.424	0.69	0.736	0.94	0.976
0.20	0.142	0.45	0.436	0.70	0.748	0.95	0.981
0.21	0.153	0.46	0.449	0.71	0.759	0.96	0.987
0.22	0.163	0.47	0.462	0.72	0.771	0.97	0.991
0.23	0.174	0.48	0.474	0.73	0.782	0.98	0.995
0.24	0.184	0.49	0.487	0.74	0.793	0.99	0.998
0.25	0.196	0.50	0.500	0.75	0.805	1.00	1.000

Tabela 2 - Coeficientes de relação entre o nível de líquido e o respetivo volume contido no interior do depósito (STOECKER WF, 1998).

D [m]	1.500
L [m]	5.000
I [m]	0.500

Total Volume [m <sup>3</sup> ]	8.836
I/D	33%
Liquid Volume [m <sup>3</sup> ]	4.418
Vapor Volume [m <sup>3</sup> ]	4.418

Liquid Volume [L]	4417.865
-------------------	----------

Calculate

Back

Figura 20 - Interface da aplicação para a determinação do volume de líquido presente num depósito de acumulação.

Na categoria que diz respeito ao compressor, apenas é necessário colocar o valor horário do volume deslocado pelo compressor, valor que é fornecido nos catálogos dos fabricantes. Na categoria da válvula de segurança os dados de entrada são o diâmetro, a área útil e o  $K_{dr}$  da válvula, para além da pressão a que se pretende que esta comece a abrir.

Clicando no botão referente às perdas de carga, a aplicação abre uma folha de cálculo, que possibilita a introdução do número de elementos presentes em cada uma das linhas, a montante e a jusante da válvula. A tabela 1 foi retirada da norma EN13136 e permite o cálculo do valor total do coeficiente de atrito para cada uma das linhas, somando o valor individual de cada elemento. Aqui podem ser calculadas as perdas de carga localizadas, como por exemplo aquelas que ocorrem em conexões e curvas a 90°, bem como as perdas de carga contínuas, isto é, aquelas que ocorrem ao longo da tubagem. Neste último caso, é necessário introduzir o comprimento, o diâmetro e a rugosidade de cada troço do tubo.

Na linha a montante da válvula é aplicado um elemento que permite a instalação de duas válvulas de segurança, permitindo que estas fiquem em funcionamento redundante, o que induz um fator de segurança à instalação, pois a probabilidade de falha simultânea de ambas é muito inferior à probabilidade de falha de apenas uma. A perda de carga deste elemento é calculada pela tabela 1, sendo necessário escolher o modelo “*changeover valve*” da marca HERL que se pretende aplicar. Porém, a seleção deste tem de ser de acordo com a dimensão da tubagem e da válvula de segurança escolhida, o que poderá implicar que depois da seleção da válvula o

utilizador tenha de seleccionar um modelo diferente.

Depois da introdução de todos os dados e de clicar no botão de finalizar, o programa guarda os valores e calcula a perda de carga para as duas linhas, abrindo novamente o menu inicial. Nesta fase, o utilizador terá de escolher a válvula de dimensão superior que satisfaça todos os requisitos da norma, os quais são apresentados quando se clica no botão de calcular “*Calculate*”.

**BS EN 13136 - Pressure relief devices and their associated**

**General**

Refrigerant: Ammonia

Pipe diameter (upstream) [mm]: 50

Pipe diameter (downstream) [mm]: 50

**Vessel**

Vessel length [m]: 5

Vessel diameter [m]: 1.5

External surface area [m<sup>2</sup>]: 27,096236637212

Temperature [°C]: -10

Internal heat production [kW]: 1

Volume of the trapped liquid in the vessel [L]: 4418

Isolation thickness of the vessel [mm]: 90

**Compressor**

Compressor displacement [m<sup>3</sup>/hr]: 90

**Relief Valve**

Kdr: 0.297

Pset [bar]: 15

Area [mm]: 201.0619264

Diameter of the relief valve [mm]: 16

**T23 DNE 20**

Manufacture	HERL
Model	T23 DNE 20
DNE	20
DNA	25
L [mm]	95
H [mm]	272
d0 [mm]	16
Outflow-coefficient	0.33
PN 1 [bar]	25
PN 2 [bar]	25

Pression loss in upstream line

Pression loss in downstream line

**CALCULATE**

**Requeriments**

1: EA >= 0.02 per litre of trapped volume	Not OK, Select a bigger relief valve
2: Upstream line (back pressure dependent - 3%)	OK
3: Downstream line (back pressure dependent - 10%)	OK
4: Velocity in the downstream line (sonic velocity)	OK, Velocity in the downstream line is smaller than the sonic velocity

Mass flow rate [kg/h]: 1113,14915645614

**Print Report**

Figura 21 – Dimensionamento de válvulas de segurança: exemplo de aplicação.

A Figura 21 seguinte apresenta um exemplo do dimensionamento de uma válvula de segurança, sendo possível observar os 4 requisitos a que a instalação da válvula terá de obedecer. Neste caso particular a válvula de segurança “T23 DNE 20” não satisfaz todas as condições, uma vez que a primeira condição não é cumprida, sendo necessária a escolha de uma válvula maior. Seleccionando a válvula de dimensão imediatamente superior, a “T23 DNE 25”, todas as condições são cumpridas (Figura 19). Porém, se os requisitos dois a cinco não forem satisfeitos é necessário diminuir as perdas de carga, aumentando, por exemplo, aumentar o diâmetro da tubagem de ambas as linhas de tubagem. É de notar que as válvulas fornecidas pelo fabricante Herl são do tipo “*back pressure dependent*”.

Clean

### BS EN 13136 - Pressure relief devices and their associated

**General**

Refrigerant: Ammonia

Pipe diameter (upstream) [mm]: 50

Pipe diameter (downstream) [mm]: 50

**Vessel**

Vessel length [m]: 5

Vessel diameter [m]: 1.5

External surface area [m<sup>2</sup>]: 27,096236637212

Temperature [°C]: -10

Internal heat production [kW]: 1

Volume of the trapped liquid in the vessel [L]: 4418 Help

Isolation thickness of the vessel [mm]: 90

**Compressor**

Compressor displacement [m<sup>3</sup>/hr]: 90

**Relief Valve**

Kdr: 0.369

Pset [bar]: 15

Area [mm]: 314.15926

Diameter of the relief valve [mm]: 20

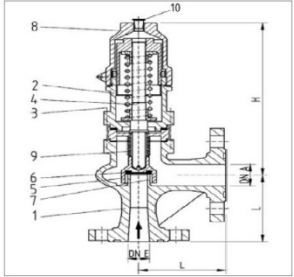
T23 DNE 25

Manufacture	HERL
Model	T23 DNE 25
DNE	25
DNA	32
L [mm]	100
H [mm]	272
d0 [mm]	20
Outflow-coefficient	0.41
PN 1 [bar]	25
PN 2 [bar]	25

Pression loss in upstream line

Pression loss in downstream line

**CALCULATE**



**Requeriments**

1: EA ≥ 0.02 per litre of trapped volume	OK
2: Upstream line (back pressure dependent - 3%)	OK
3: Downstream line (back pressure dependent - 10%)	OK
4: Velocity in the downstream line (sonic velocity)	OK, Velocity in the downstream line is smaller than the sonic velocity

Mass flow rate [kg/h]: 1113,14915645614 Print Report

Figura 22 - Dimensionamento de válvulas de segurança: valores de entrada assumidos de forma a que todos os requisitos sejam cumpridos.



#### 4. APLICAÇÃO ANDROID PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS

No decorrer do estágio surgiu a ideia de transpor o aplicativo referente ao cálculo dos processos psicrométricos para uma aplicação que pudesse ser executada em dispositivos *Android*. As vantagens inerentes a esta aplicação são a possibilidade de poder ser executada em qualquer local e de ser colocada na loja de aplicações do Google, ficando disponível para milhões de utilizadores e divulgando-se assim o nome da empresa. Adicionalmente, uma mais-valia desta aplicação passaria pelo facto de ser menos propensa a erros causados por modificações do utilizador, pois não é possível a alteração da programação do *software*, o que não acontece com um ficheiro *Excel*, uma vez que neste se ocorrer algum erro é possível modificar a programação efetuada. A programação desta aplicação foi efetuada em linguagem Java que, apesar de não ser semelhante à de Visual Basic, partilha os mesmos princípios de programação, o que permitiu uma fácil ambientação à linguagem. O programa utilizado na elaboração da aplicação foi o “Eclipse” com a ferramenta “*Android Development Tool*”.

Na Figura 23 é possível visualizar o menu que é mostrado ao utilizador quando este inicia aplicação. Nele encontram-se as principais opções do aplicativo, que são o cálculo de processos psicrométricos e a determinação de propriedades psicrométricas do amoníaco e do R134a. Adicionalmente, é possível saber mais sobre a empresa J & E Hall, visitar o seu *website* e ter acesso aos contactos da empresa, através das 3 últimas opções disponíveis no menu inicial.

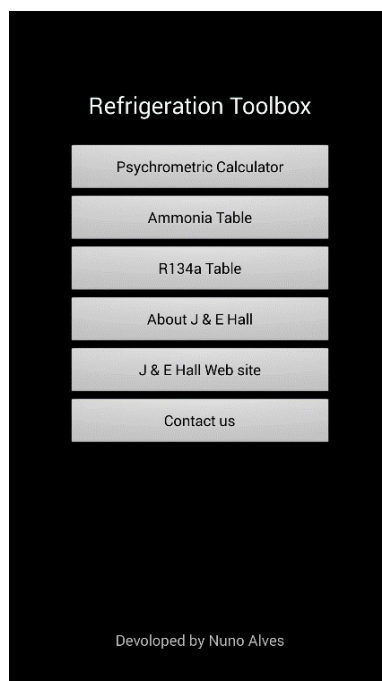


Figura 23 - Menu inicial da aplicação Android

Ao clicar-se no botão “*Psychrometric Calculator*” surgem ao utilizador as opções correspondentes a cada processo psicrométrico e que foram explicadas anteriormente, pois são idênticas ao programa criado em “*Excel VBA*”. Clicando no botão que tem o símbolo de um ponto de interrogação o utilizador tem acesso a ajudas para cada um dos processos psicrométricos.

Nas figuras 24 a 26 é possível visualizar, respetivamente o menu em questão, um exemplo de cálculo de um processo psicrométrico e a respetiva ajuda apresentada pela aplicação.

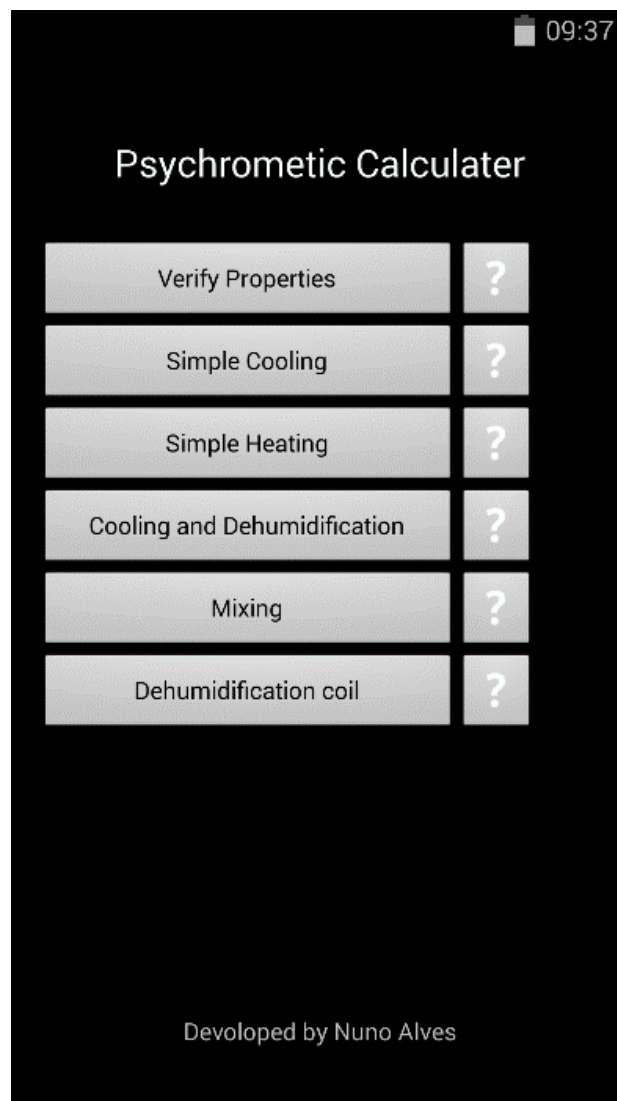


Figura 24 – Processos psicrométricos disponíveis na aplicação Android desenvolvida.



14:21

### Dehumidification Coil

Mass Flow

Volume Flow

Mass Flow [kg/s]

Tdb 1 [°C]

Twb [°C]

RH [%]

RH [%]

Tdb 2 [°C]

Twb [°C]

RH [%]

RH [%]

#### Point 1

Twb [°C]	27.46
Moist. Cont. [kgv/kga]	0.02115
Sp. Enthaply [kJ/kg]	86.14
Sp. Volume [m3/kg]	0.89
Tdp [°C]	25.56

#### Point 2

Twb [°C]	14.76
Moist. Cont. [kgv/kga]	0.00698
Sp. Enthaply [kJ/kg]	40.81
Sp. Volume [m3/kg]	0.85
Tdp [°C]	8.55

#### Results

Total Energy [kW]	226.65
Latent heat [kW]	45.83
Sensible Heat [kW]	180.82

Calculation

Figura 25 – Exemplo de cálculo na aplicação Android desenvolvida.

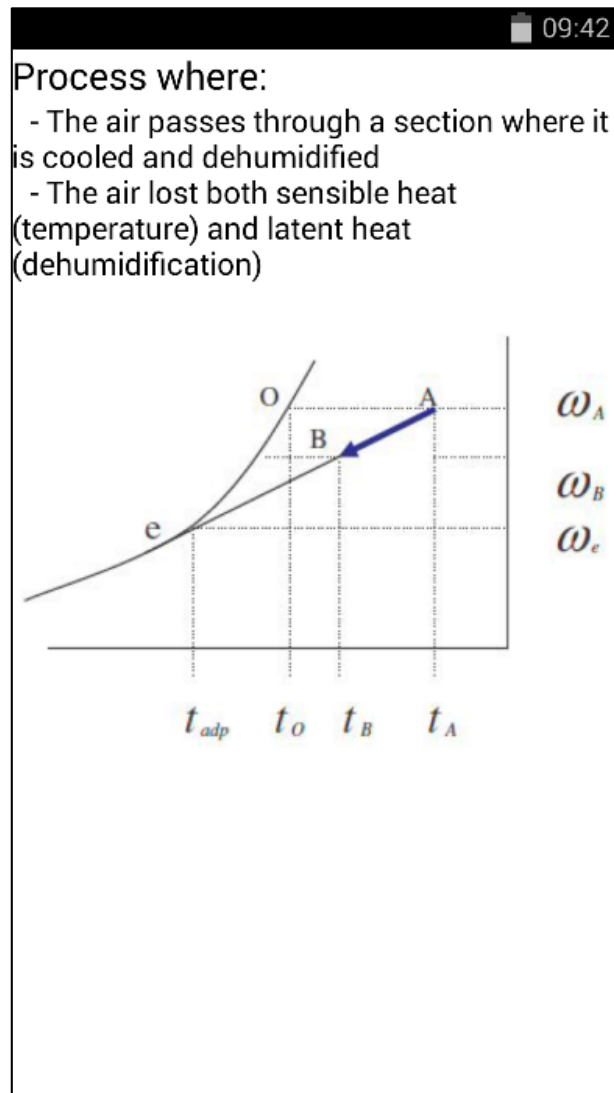


Figura 26 - Janela com um exemplo de uma ajuda que a aplicação fornece para cada processo psicrométrico.

Voltando ao menu inicial o utilizador pode determinar as propriedades termodinâmicas dos fluidos frigorigéneos R717 (Amoníaco) e R134a, sendo para tal necessário seleccionar as opções correspondentes a cada um. Para a determinação destes valores, foram definidas em Java matrizes que continham as informações das propriedades de cada fluido frigorigéneo a diferentes temperaturas. Se esta variável tiver valor não inteiro então a aplicação determina as propriedades realizando sucessivas interpolações utilizando valores correspondentes à temperatura imediatamente anterior e imediatamente posterior à introduzida.

Nas figuras 27 e 28 é possível observar exemplos de cálculo das propriedades do amoníaco, após a introdução de uma temperatura de saturação ou de uma pressão de saturação. Clicando

no botão “*J & E Hall Website*” e “*Contacts*” a aplicação abre a página inicial da internet da empresa e a página de contactos. Na Figura 29 é mostrada a janela que permite ao utilizador saber mais sobre a empresa “J & E Hall”.

Ammonia Properties

Tsats [°C] Psat [kPa]

Tsats [°C] -20

Psat [kPa]	190.20000
Sp. Vol. Liq. [m <sup>3</sup> /kg]	0.00150
Sp. Vol. Evap. [m <sup>3</sup> /kg]	0.62190
Sp. Vol. Vap. [m <sup>3</sup> /kg]	0.62340
Sp. Int. En. Liq. [kJ/kg]	107.94000
Sp. Int. En. Evap. [kJ/kg]	1211.30000
Sp. Int. En. Vap. [kJ/kg]	1319.20000
Sp. Enthalp. Liq. [kJ/kg]	108.20000
Sp. Enthalp. Evap. [kJ/kg]	1329.50000
Sp. Enthalp. Vap. [kJ/kg]	1437.70000
Sp. Entrop. Liq. [kJ/kg]	0.65270
Sp. Entrop. Evap. [kJ/kg]	5.25190
Sp. Entrop. Vap. [kJ/kg]	5.90460

Calculation

Figura 27 - Janela da aplicação contendo as propriedades de amoníaco para uma temperatura de saturação de -20°C.

14:20

## Ammonia Properties

Tsat [°C]

Psat [kPa]

Psat [kPa]

189

Tsat [°C]	-20.15238
Sp. Vol. Liq. [m <sup>3</sup> /kg]	0.00150
Sp. Vol. Evap. [m <sup>3</sup> /kg]	0.62629
Sp. Vol. Vap. [m <sup>3</sup> /kg]	0.62779
Sp. Int. En. Liq. [kJ/kg]	107.24857
Sp. Int. En. Evap. [kJ/kg]	1211.83333
Sp. Int. En. Vap. [kJ/kg]	1319.04000
Sp. Enthalp. Liq. [kJ/kg]	107.50667
Sp. Enthalp. Evap. [kJ/kg]	1329.98381
Sp. Enthalp. Vap. [kJ/kg]	1437.49429
Sp. Entrop. Liq. [kJ/kg]	0.64995
Sp. Entrop. Evap. [kJ/kg]	5.25706
Sp. Entrop. Vap. [kJ/kg]	5.90700

Calculation

Figura 28 - Janela da aplicação com as propriedades de amoníaco para uma pressão de saturação de 189 kPa.



Figura 29 - Janela da aplicação contendo informação sobre a empresa J&E Hall.



## 5. SIMULAÇÃO DE FLUXO DE AR E DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NUMA CAMARA FRIGORÍFICA

No decorrer do estágio foi proposta pela empresa a avaliação do impacto das infiltrações de ar numa câmara frigorífica, nomeadamente aquelas que ocorrem devido à abertura de portas. Como este objetivo, utilizou-se a ferramenta “*Flowsimulation*” do *software* “*Solidworks*”, permitindo o estudo da distribuição das temperaturas e do movimento do ar antes e depois da abertura de uma porta.

Numa primeira fase foi necessário desenhar em 3D os evaporadores que iriam ser colocados no espaço a refrigerar e a geometria da câmara frigorífica. Nas figuras 30 e 31 é possível visualizar, respetivamente, um dos evaporadores padrão utilizados no projeto e a disposição dos mesmos no espaço a refrigerar.

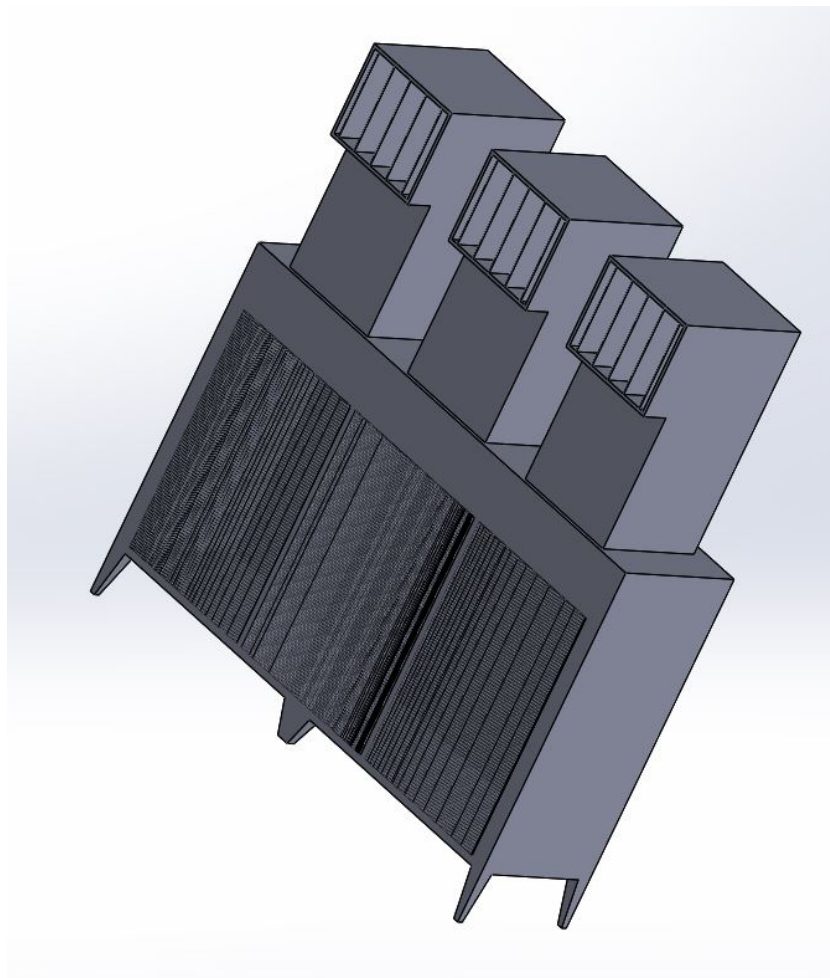


Figura 30 - Representação 3D em *Solidworks* de um evaporador típico de um sistema de refrigeração.

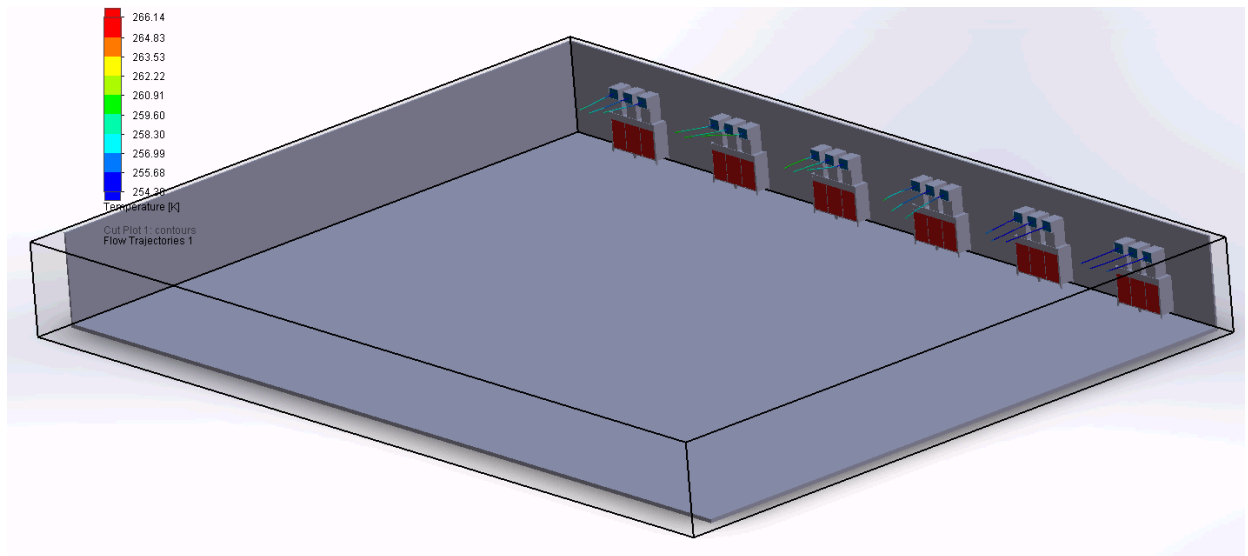


Figura 31 - Representação em *Solidworks* de uma câmara de refrigeração.

De seguida definiram-se os parâmetros que a realização da simulação pressupõe:

- Temperatura interior da câmara frigorífica igual a  $-20^{\circ}\text{C}$ ;
- Caudal de ar à saída do evaporador igual a  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ , sendo a sua temperatura igual a  $-23^{\circ}\text{C}$ . Na figura 31 a saída de ar está representada a azul;
- Caudal de ar à entrada de cada evaporador igual ao de saída. Na figura 31 a área de entrada de ar está representada a vermelho;
- Pressão atmosférica e temperatura de  $3^{\circ}\text{C}$  no exterior da porta;

Estes parâmetros estão representados nas figuras 32 a 34.



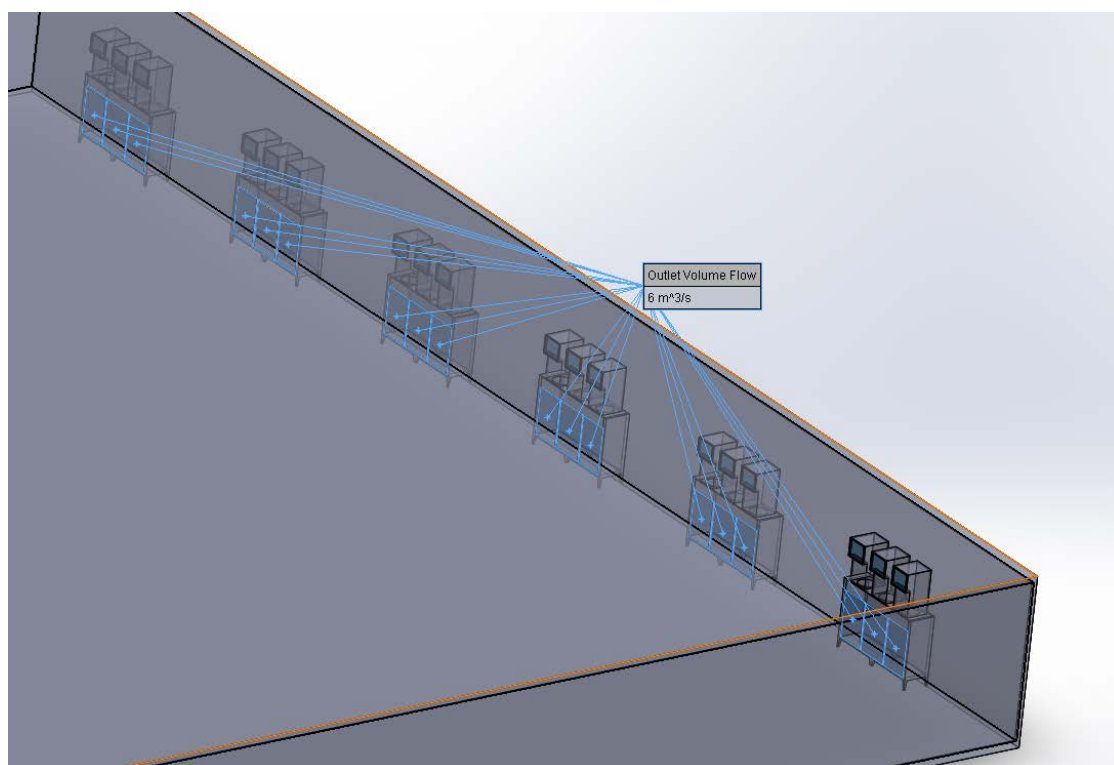


Figura 32 - Representação do caudal de ar que entra em cada evaporador no estudo realizado.

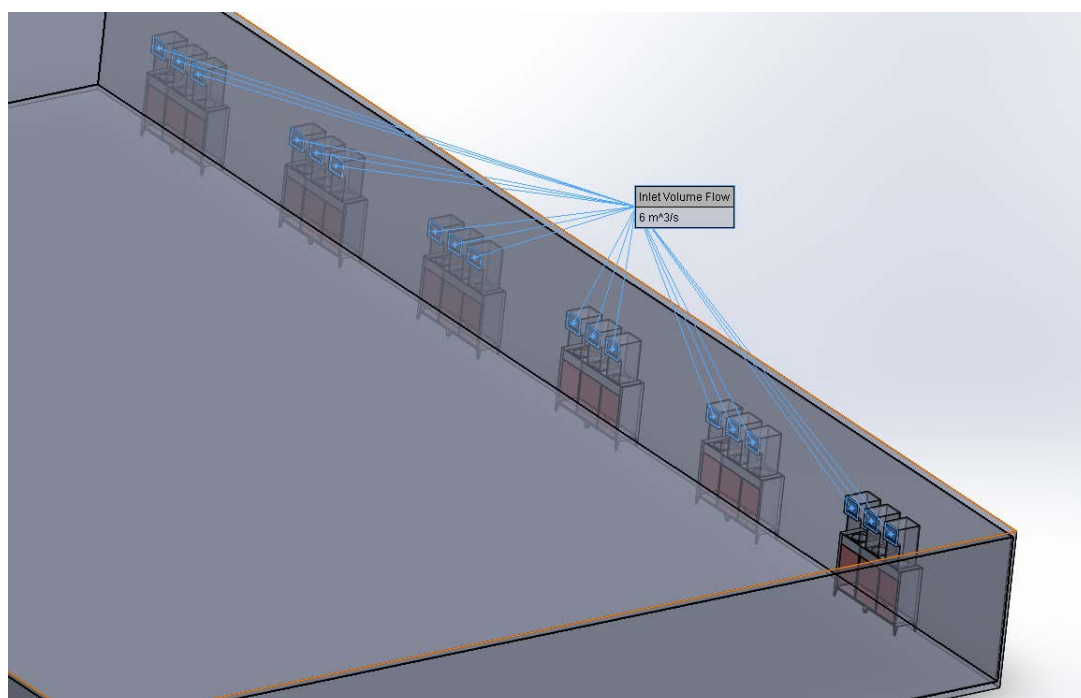


Figura 33 - Representação do caudal de ar que abandona cada evaporador no estudo realizado.

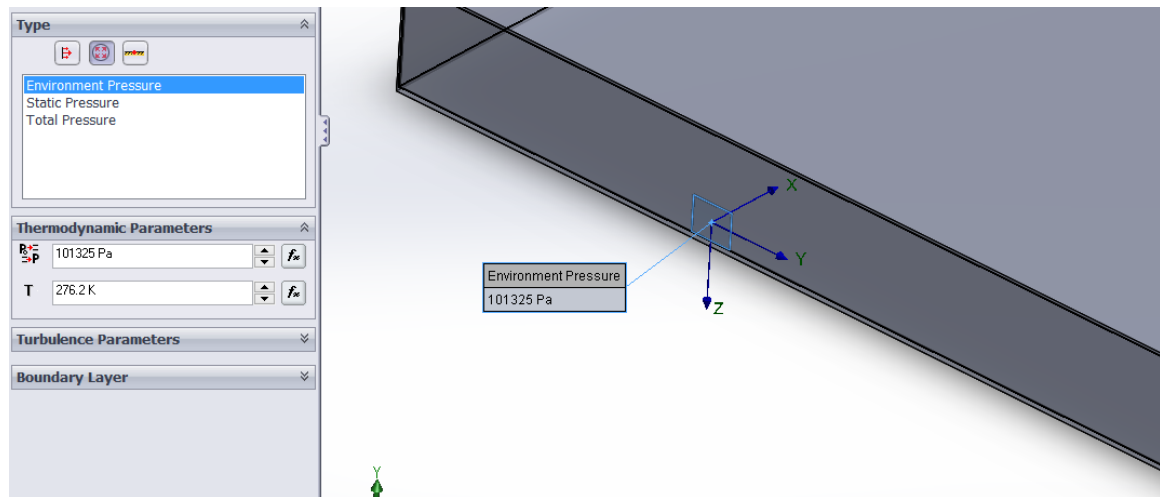


Figura 34 - Pormenor da porta da câmara de refrigeração, estando no exterior uma temperatura de 3°C.

Após a introdução dos parâmetros de entrada, procedeu-se à realização da simulação do movimento do fluxo de ar e da distribuição de temperaturas na sala. Como seria de esperar, a abertura da porta da câmara provoca um aumento de temperatura de cerca de 10°C, sendo esta diferença progressivamente atenuada quando nos afastamos da porta. Observando a animação do escoamento de ar na câmara frigorífica, conclui-se que o movimento do ar no espaço é bastante influenciado pela abertura da porta. Nas figuras 35 a 39 é possível observar alguns *frames* das animações criadas, que simulam o fluxo de ar e a distribuição do campo de temperaturas na câmara frigorífica.

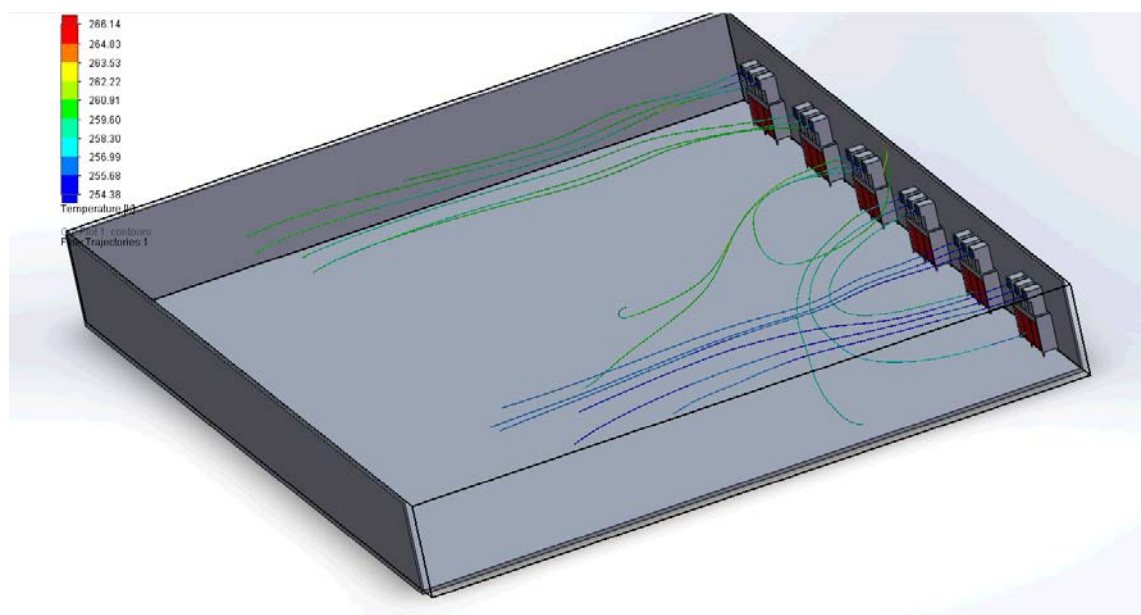


Figura 35 - *Frame* que ilustra o fluxo de ar ao sair dos evaporadores.

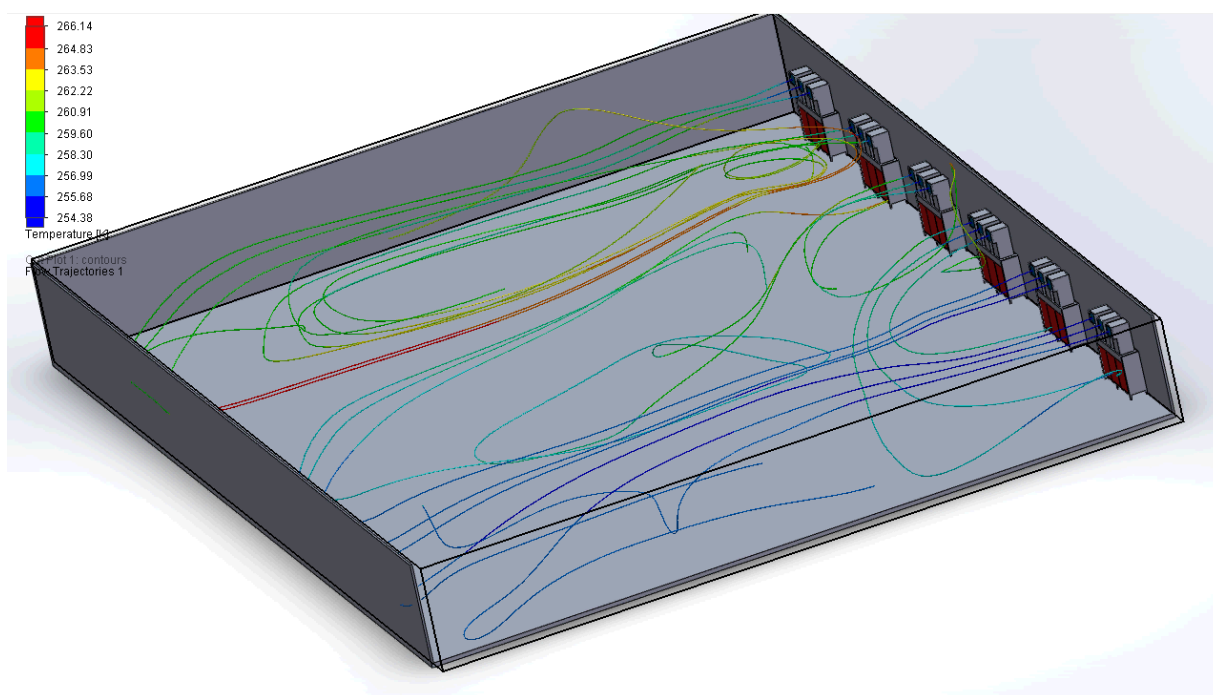


Figura 36 - *Frame* que ilustra o fluxo de ar ao sair dos evaporadores.

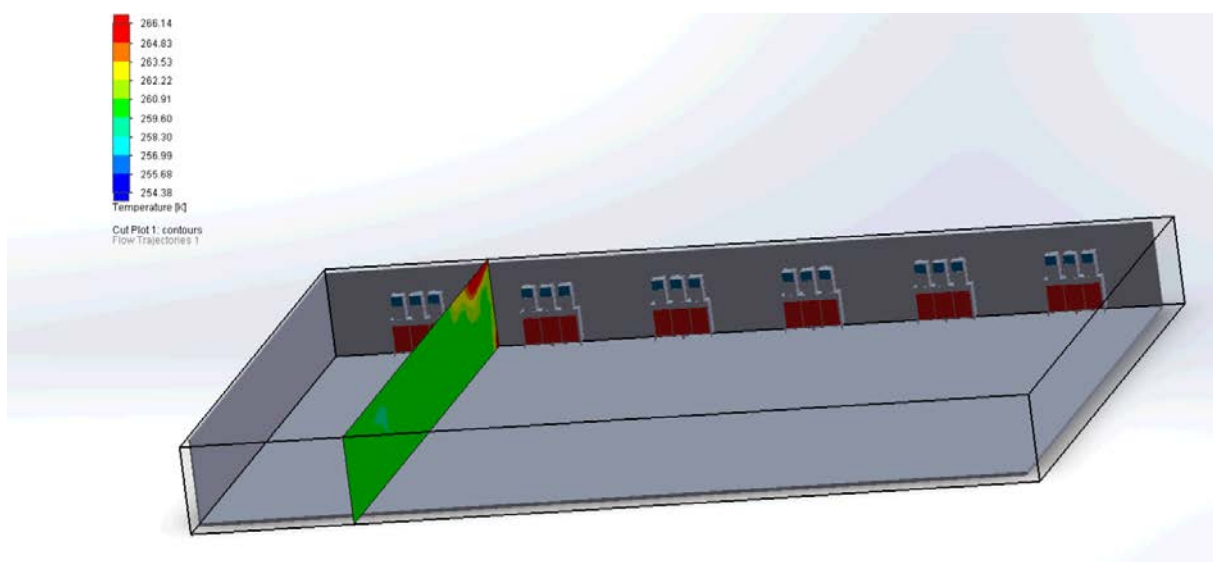


Figura 37 - *Frame* que ilustra a distribuição de temperaturas na câmara frigorífica.

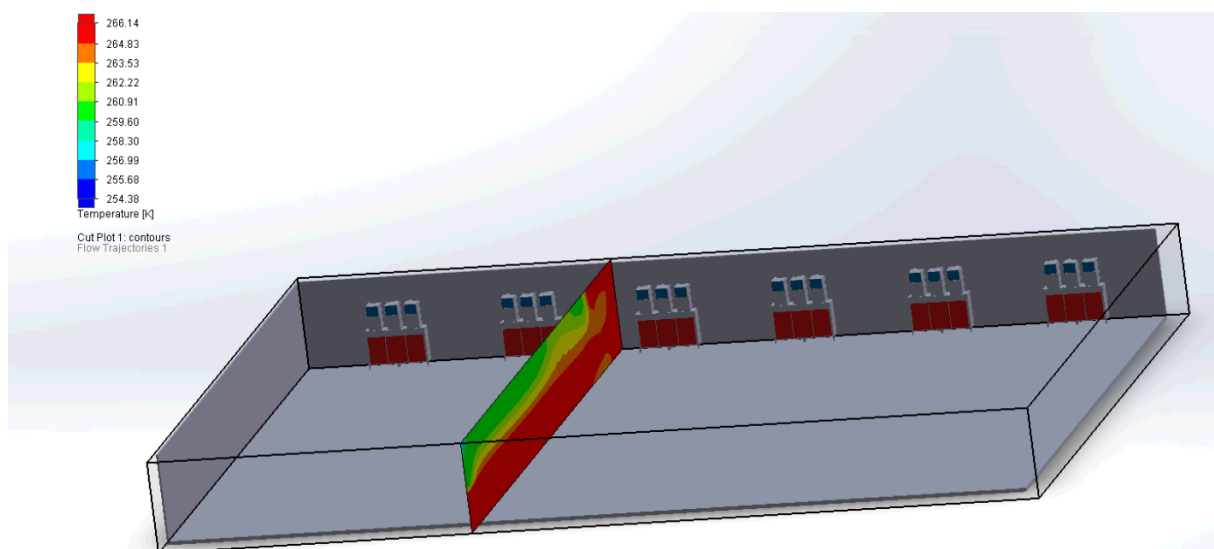


Figura 38 - *Frame* que ilustra a distribuição de temperaturas na câmara frigorífica.

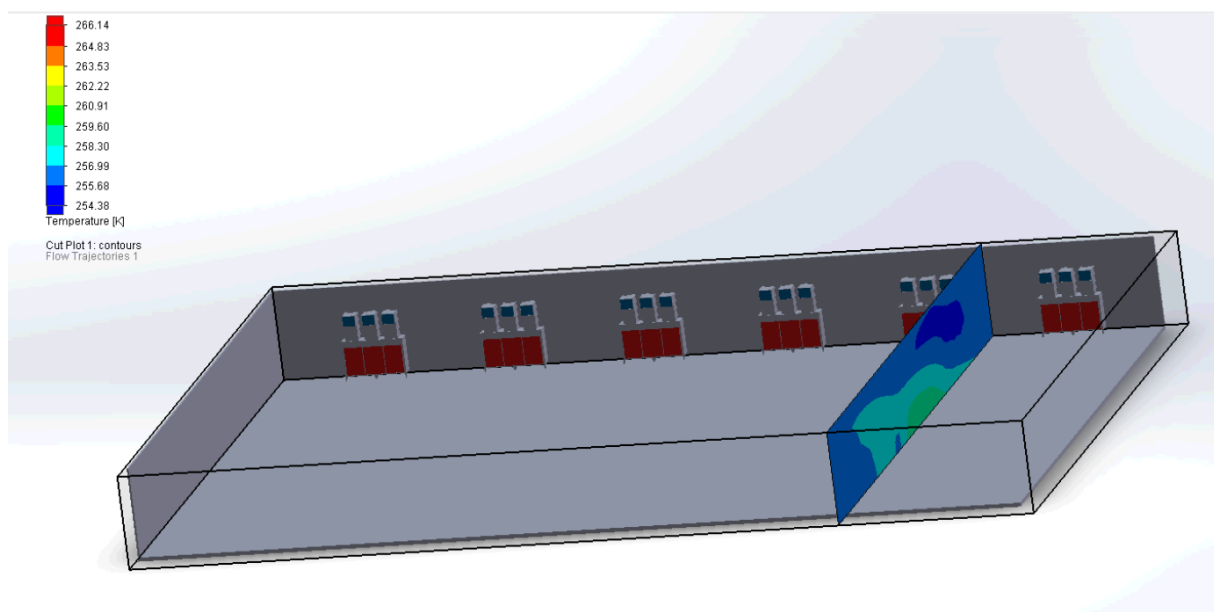


Figura 39 - *Frame* que ilustra a distribuição de temperaturas na câmara frigorífica

## 6. CÁLCULO DE PERDAS DE CARGA EM SISTEMAS DE GLICOL

### 6.1. Enquadramento

Outro *software* desenvolvido no âmbito do estágio teve como objetivo o cálculo de perdas de carga em tubagens e elementos pertencentes a um sistema de refrigeração onde se aplica glicol como fluido frigorigéneo. Para tal, optou-se pela elaboração de um ficheiro *Excel* no qual seria possível calcular estes valores, sendo para tal necessário dividir o circuito da tubagem em diferentes secções.

Neste tipo de sistemas, o glicol encontra-se sempre no estado líquido, havendo apenas mudança da temperatura do glicol quando este entra no evaporador. Diz-se então que ocorre transferência de calor sensível entre o ar do espaço a refrigerar e o fluido, pois apenas ocorre a alteração da sua temperatura e não do seu estado físico. É importante destacar ainda que a percentagem de glicol depende da temperatura de aplicação do sistema, pois para temperaturas mais baixas é necessário aplicar uma maior concentração de glicol, com o objetivo de assegurar que o fluido não congela no circuito.

O aplicativo informático tem como objetivo o cálculo da quantidade de glicol presente na instalação e o dimensionamento da bomba recicladora para o sistema, determinando o caudal mássico de glicol e o valor total das perdas de carga na instalação.

## 6.2. Fórmulas consideradas

Tendo em conta que o glicol se encontra sempre em estado líquido decidiu-se recorrer à fórmula de “Darcy” para o cálculo das perdas de carga nas tubagens, uma vez que é a mais adequada para este tipo de fluido e condições de utilização. Adicionalmente, esta fórmula permite a obtenção de valores de perda de carga ligeiramente superiores aos que ocorrem na realidade, o que introduz um fator de segurança adicional no dimensionamento do sistema.

Os valores de entrada que o utilizador terá de inserir em cada tubagem são os seguintes:

- Percentagem de glicol;
- Comprimento de cada secção de tubagem, em metros;
- Temperatura de entrada e de saída do glicol no evaporador, em graus Celcius;
- Velocidade máxima permitida em cada secção considerada, em metros por segundo;
- Valores adicionais de perda de carga, em bar;
- Rugosidade da tubagem, em milímetros;

### 6.2.1. Propriedades gerais do glicol e da tubagem

Numa primeira fase realizou-se a recolha das propriedades do glicol necessárias para a execução dos cálculos respetivos a esta aplicação, sendo estas a massa volúmica, viscosidade cinemática e calor específico. Os valores utilizados para quantificar estas propriedades foram retirados de tabelas pertencentes ao manual técnico da FRIOGEL NEO, que é a empresa fornecedora de glicol da J & E Hall.

#### 2.2. Density of water solutions of FRIOGEL® at 20°C

Concentration FRIOGEL® NEO (% in volume)	Solution density kg / dm <sup>3</sup>
10	1,008
15	1,013
20	1,018
25	1,023
30	1,028
35	1,032
40	1,037
45	1,040
50	1,044
55	1,046
60	1,048

Tabela 3 - Densidade de glicol em função da sua concentração.

**24. Kinematic viscosity of water solutions of FRIOGEL® NEO (centistokes cSt)\***

FRIOGEL® NEO concentration (% in volume)	25	30	35	40	45	50
Temperature °C	FROST ZONE					
- 30						206,7
- 20				44,3	60,8	83,1
- 10	9,7	12,8	16,9	22,3	29,3	38,2
0	6,0	7,7	9,8	12,4	15,7	19,7
10	3,9	4,9	6,1	7,5	9,2	11,2
20	2,8	3,3	4,0	4,9	5,8	6,9
30	2,0	2,4	2,8	3,3	3,9	4,5
40	1,5	1,8	2,1	2,4	2,8	3,1
50	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3
60	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8
70	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4
80	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
90	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0
100	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8

Tabela 4 - Viscosidade do glicol em função da sua concentração e temperatura.

**2.5. Specific heat of water solutions of FRIOGEL® NEO (kJ. kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)\***

FRIOGEL® NEO concentration (% in volume)	25	30	35	40	45	50
Temperature °C	FROST ZONE					
- 30						3,4
- 20				3,6	3,5	3,4
- 10	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4
0	3,9	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5
10	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5
20	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5
30	4,0	3,9	3,8	3,8	3,7	3,6
40	4,0	3,9	3,9	3,8	3,7	3,6
50	4,0	3,9	3,9	3,8	3,7	3,7
60	4,0	4,0	3,9	3,8	3,8	3,7
70	4,0	4,0	3,9	3,9	3,8	3,7
80	4,1	4,0	4,0	3,9	3,8	3,8
90	4,1	4,0	4,0	3,9	3,9	3,8
100	4,1	4,0	4,0	4,0	3,9	3,8

Tabela 5 - Calor específico de glicol em função da sua concentração e temperatura.

De seguida procedeu-se ao levantamento dos valores de rugosidade dos materiais mais utilizados em tubagens de glicol. Os materiais e os valores de rugosidade considerados foram os seguintes:

- Aço inoxidável, com rugosidade igual a 0,0015 mm;
- PVC, com rugosidade igual a 0,005 mm
- Aço galvanizado, com rugosidade igual a 0,15 mm

### 6.2.2. Caudal mássico de glicol

Seguidamente procedeu-se ao cálculo do caudal mássico de glicol que passa na secção considerada. O caudal que a bomba recicladora terá de assegurar é igual ao valor máximo de caudal mássico calculado, ou seja na linha principal do circuito que corresponde à secção onde a bomba vai estar instalada.

Sabendo que:

$$P[kW] = \dot{m} \times (cp_2 \times T_2 - cp_1 \times T_1)$$

Tem-se que:

$$\dot{m} [kg/s] = \frac{P}{cp_2 \times T_2 - cp_1 \times T_1}$$

Onde:

- $P$  [kW] – Potência frigorífica
- $\dot{m}$  [kg/s] – Caudal mássico
- $cp_1$  [kJ/kg.K] – Calor específico do glicol à entrada do evaporador
- $cp_2$  [kJ/kg.K] – Calor específico do glicol à saída do evaporador
- $T_2$  [°C] – Temperatura do glicol à saída do evaporador
- $T_1$  [°C] – Temperatura do glicol à entrada do evaporador

### 6.2.2. Diâmetro interno normalizado

Através do caudal mássico e da massa volúmica foi possível calcular o caudal volúmico recorrendo à seguinte fórmula:

$$\dot{V}[m^3/s] = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

Onde:

- $\dot{V}$  [m³/s] – Caudal volúmico
- $\rho$  [kg/m³] = Massa específica



Por sua vez, o caudal volúmico foi utilizado para calcular o diâmetro interno mínimo de forma a assegurar que o valor da velocidade na tubagem era inferior ao valor máximo fixado.

Sabendo que:

$$\dot{V} \left[ \frac{m^3}{s} \right] = A \times u$$

$$A [m^2] = \pi \times \frac{\phi_i^2}{4}$$

Tem-se que:

$$\phi_i [mm] = 1000 \times \sqrt{\frac{4 \times \dot{V}}{u \times \pi}}$$

Onde:

- $\phi_i$  [mm] = Diâmetro interno
- $A$  [m<sup>2</sup>] = Área transversal interna da tubagem
- $u$  [m/s] – Velocidade
- $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] = Massa específica

Calculado o diâmetro interno mínimo necessário para assegurar que a velocidade do glicol seja inferior à pretendida, procedeu-se à conversão do diâmetro interno para o normalizado (DN), com o auxílio da tabela 3 e da seguinte fórmula.

$$\phi_{i \text{ normalizado}} = \phi_i - 2 \times thickness$$

Onde:

- *thickness* [mm] – Espessura da parede da tubagem

- *DN* - Dimensão nominal (EN ISO 6708:1995)

Diameter inside - DN (mm)	Thickness (mm)
15	1,5
20	1,5
25	1,5
32	1,5
40	1,5
50	1,5
65	1,5
80	1,5
100	1,5
125	2
150	2
200	2
250	2
300	2,5

Tabela 6 - Espessura das paredes da tubagem em função dos seus diâmetros normalizados

### 6.2.3. Cálculo das perdas de carga

De seguida é necessário calcular as perdas de carga total do sistema, recorrendo à fórmula de Darcy. As equações necessárias para chegar a esse valor são as seguintes.

Fórmula para a obtenção do número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \times u \times \phi_{i \text{ normalizado}}}{\mu}$$

Onde:

-  $\mu$  [Pa.s] – Viscosidade cinemática do glicol

-  $Re$  – Número de Reynolds

Cálculo do coeficiente de atrito através da correlação proposta por Moody:

$$\lambda = \sqrt[3]{0,0055 \times \left( 1 + \left( 20000 \times \frac{\varepsilon}{\phi_{i \text{ normalizado}}} \times \frac{10^6}{Re} \right) \right)}$$

Onde:

$\varepsilon$  [mm] – Rugosidade do material constituinte da tubagem

$\lambda$  – Coeficiente de atrito

Perda de carga contínua (fórmula de Darcy):

$$\Delta P \text{ contínua} = \frac{\lambda \times L}{\phi_{i \text{ normalizado}}} \times \frac{u^2}{2 \times g}$$

Legenda:

$L$  [m] – Comprimento da tubagem

$g$  [m/s<sup>2</sup>] – Aceleração da gravidade

Perda de carga local:

$$\Delta P \text{ local} = \sum K_L \times \frac{u^2}{2 \times g}$$

Onde:

$\sum K_L$  – Somatório dos coeficientes relativos aos acessórios presentes na tubagem

Na seguinte tabela encontram-se representados os valores de KL relativos aos acessórios e elementos considerados.

Branch		
A	B	
Stop valves	KL	No.
Ball valves	0.05	
Globe valves	10	
Butterfly valves	0.3	

Other valves	KL	No.
Double regulating valves	0.5	
Three prt valves	0.3	

Misc items	KL	No.
Filter	0.23	
Non return valve(hinged)	2	
Non return valve(spring)	4	
45 Elbow	0.4	
90 Elbow	1.5	
Equal tee	1.8	
Branch tee	0.45	
Reduces	0.15	
Orifice plate		
Saoenoid valve		

Total KL	0
----------	---

Tabela 7 - Valores de KL assumidos no aplicativo informático.

Por fim, o valor total de perda de carga no troço de tubagem considerado é dado pela seguinte fórmula:

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{localizada}} + \Delta P_{\text{contínua}}$$

#### 6.2.4. Cálculo da quantidade de glicol presente na instalação

O volume total de glicol presente em cada tubagem é dada pela seguinte fórmula (volume de um cilindro):

$$V [m^3] = \pi \times \phi_{i \text{ normalizado}}^2 \times L$$

O volume total de glicol na instalação é igual ao somatório do volume interno de todas as tubagens mais o volume interno em cada dispositivo da instalação, como por exemplo permutadores de calor, serpentinas de evaporadores e *chillers*.

### 6.3. Interface

Ao iniciar o aplicativo informático o utilizador é deparado com a folha de cálculo exibida na figura 40. A cinzento encontram-se representados os valores de entrada que o utilizador terá de introduzir, sendo eles a nomenclatura assumida do início e fim do troço de tubagem, o comprimento, a potência calorífica que o glicol retira dos espaços refrigerados, a temperatura à saída e entrada do evaporador, a velocidade máxima considerada e outras perdas de carga presentes na tubagem, como por exemplo nas serpentinas do evaporador ou em válvulas específicas.

De seguida é necessário determinar os valores dos fatores “KI”, que representam os elementos que produzem perdas de carga localizadas, sendo para tal preciso clicar na hiperligação “*Calculate K Factors*” referente a cada trecho de tubagem.

Depois da introdução destes valores o programa vai determinar todos os valores intermédios necessários para o cálculo das perdas de carga na secção considerada. No anexo 5 encontra-se representado um esquema que ilustra os cálculos intermédios que o programa realiza para determinar as perdas de carga.

Concluída a fase de inserção de todos os valores de entrada do sistema é então possível determinar as perdas de carga do sistema, selecionando alternadamente os troços de tubagem que em conjunto perfazem um circuito fechado do sistema. Sendo a instalação geralmente um sistema paralelo, o estudo terá de ser efetuado para todos os diferentes circuitos possíveis, sendo a perda de carga total da instalação igual à queda de pressão máxima de entre todos os circuitos estudados.

Concluído o dimensionamento é possível determinar a perda de carga e o caudal mássico e assim dimensionar a bomba que se terá de aplicar na instalação. E ainda o diâmetro da tubagem, a velocidade do glicol em cada secção da instalação e a quantidade de glicol presente na instalação dimensionada.

[illegible]

Figura 40 - Interface referente a sistemas de refrigeração onde glicol é aplicado.

Para um melhor entendimento do programa por parte dos funcionários da empresa foi realizado um manual que explica detalhadamente as características e princípio de funcionamento do *software*, dando também um caso de exemplo. Este documento pode ser consultado no anexo número 1.





## 7. ATIVIDADES COMPLEMENTARES REALIZADAS DURANTE O ESTÁGIO

A realização do estágio profissional, tal como referido anteriormente teve como principal objetivo a elaboração de aplicativos informáticos que permitissem um dimensionamento rápido e simples dos principais componentes referentes a um sistema de refrigeração industrial. No entanto, foram realizadas outras atividades que permitiram ter um contato com outras vertentes do funcionamento da empresa, tanto a nível comercial como a nível de projeto, instalação, comissionamento e manutenção de instalações de refrigeração industrial.

De forma a adquirirmos competências a nível comercial, efetuaram-se contactos com fornecedores e clientes da J & E Hall, por via telefone, *mail* e presencial. Esta comunicação tinha como finalidade o pedido de informações para a realização de orçamentos para clientes, tendo sido feito um acompanhamento constante por parte de elementos da empresa. Adicionalmente, foi possível desenvolver competências no âmbito da comunicação em língua inglesa, do trabalho em equipa e do conhecimento de termos linguísticos e processos relativos à indústria de refrigeração.

Relativamente ao projeto e dimensionamento de sistemas de refrigeração, foram elaborados em *software* “AUTOCAD” plantas e esquemas de componentes relativos a instalações de refrigeração, tais como tubagens, evaporadores, condensadores, válvulas, compressores, entre outros. É de notar que, durante o estágio foi possível utilizar os aplicativos elaborados, realizando o dimensionamento e o cálculo de tubagens para sistemas de amoníaco e glicol e de restantes componentes como acumuladores. Adicionalmente, foi também possível determinar cargas térmicas de câmaras de refrigeração e o cálculo de processos psicrométricos, recorrente também às aplicações desenvolvidas.

No decorrer do estágio foram realizadas duas visitas a instalações de refrigeração industrial, que se encontravam em fase de construção e comissionamento. A primeira visita decorreu durante o mês de Novembro de 2013 e foi realizada a uma instalação que se encontrava na fase final de construção e utilizava como fluido frigorigéneo principal o amoníaco, e como fluido secundário o glicol, sendo o primeiro utilizado em espaços que se encontravam a baixas temperaturas e o segundo em câmaras onde a sua temperatura não era inferior a  $-10^{\circ}\text{C}$ . É importante destacar que compressores de parafuso único “Hallscrew”, fabricadas pela empresa, foram instalados no sistema principal de amoníaco e que a libertação de calor para o ambiente era efetuada no sistema primário utilizando condensadores de amoníaco. O arrefecimento do

glicol era realizado através de um permutador de calor de placas, que permitia a libertação de calor do sistema secundário para o primário.

A segunda visita decorreu durante o mês de Fevereiro de 2014 e foi realizada a uma instalação de amoníaco, que se encontrava já na fase de comissionamento. Aqui foi explicado os procedimentos gerais de comissionamento e o funcionamento do sistema informático empregue na instalação e que permitia o seu controlo. As suas principais funções era a medição de parâmetros como temperatura e pressão em diversos componentes do sistema, permitindo assim avaliar o funcionamento geral da instalação e emitir avisos se algum parâmetro não estivesse segundo valores de segurança, o que podia indicar que o componente não estava a funcionar corretamente. Adicionalmente, era possível controlar remotamente cada componente do sistema, não sendo necessário assim a deslocação ao local de instalação de cada um.

Nas últimas duas semanas do estágio realizou-se o acompanhamento das atividades de desenvolvimento de compressores “Hallscrew” do tipo parafuso único, fabricados pela empresa na cidade de Dartford. Aqui foi possível desenvolver competências em *softwares* de desenho 3D como o “Solidworks” e acompanhar ensaios laboratoriais realizados a estes componentes.

Em seguida são apresentadas fotografias de componentes de cada instalação tiradas durante as visitas efetuadas.



Figura 41 - Condensadores de amoníaco instalados no topo de um edifício.



Figura 42 - Compressor de parafuso único "Hallscrew", fabricado pela "J & E Hall"



## 8. CONCLUSÕES

No decorrer deste relatório foram abordados diversos *softwares* desenvolvidos durante o estágio de mestrado na empresa J & E Hall, sendo eles o cálculo de processos e propriedades psicrométricas, o dimensionamento de válvulas de segurança segundo a norma BS EN 13136, o dimensionamento de depósitos de acumulação para sistemas de refrigeração utilizando o amoníaco como fluido frigorigéneo e o desenvolvimento de uma aplicação *Android* que permite o cálculo de processos psicrométricos e das principais propriedades de amoníaco e R134A. Adicionalmente foram desenvolvidos aplicativos que permitem o cálculo de perdas de carga em tubagem de glicol e amoníaco e o cálculo das cargas térmicas em câmaras de refrigeração.

Visto que todos os *softwares* propostos inicialmente foram elaborados e que complementarmente se realizaram aplicações adicionais, pode concluir-se que os objetivos iniciais propostos pela empresa foram atingidos.

A realização deste estágio revelou-se bastante vantajosa tanto para empresa como para os alunos, na medida que possibilitou à empresa um dimensionamento mais rápido e eficiente dos principais cálculos relativos à refrigeração industrial e o aprofundamento de conhecimentos na área da refrigeração industrial por parte dos alunos, quer a nível de conteúdos teóricos quer em aspetos práticos do desenvolvimento, construção e comissionamento de instalações de refrigeração. Adicionalmente o estágio possibilitou o desenvolvimento de capacidades de seleção, organização e interligação de informação presentes em diversas fontes, como por exemplo artigos e livros científicos, páginas de *internet* e projetos anteriormente desenvolvidos pela empresa nos últimos trinta anos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE Handbook - Refrigeration, ASHRAE Inc., 2006. ISBN: 978-1-931862-86-8

BS EN 13136:2001 Refrigerating systems and heat pumps – Pressure relief devices and their associated piping – Methods for calculation. ISBN 0-580-38288-5

Calor específico de materiais [Consult. 21 Abril 2014]. WWW:<URL: [http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html)>;

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. – *Thermodynamics, an engineering approach*, McGraw-Hill.

Danfoss aprendizagem [Consult. 10 Jan. 2014]. WWW:<URL: <http://learning.danfoss.com/portuguese>>; 2013

FRAZER Stephen. Diagrama psicrométrico [Consult. 22 Mar. 2014]. Disponível em WWW:<URL: [http://www.arca53.dsl.pipex.com/index\\_files/psy3.htm](http://www.arca53.dsl.pipex.com/index_files/psy3.htm)>;

Humidity Formulas [Consult. 14 Fev. 2014]. Disponível em WWW:<URL: [http://www.gorhamschaffler.com/humidity\\_formulas.htm](http://www.gorhamschaffler.com/humidity_formulas.htm)>;

MALÇA J – Instalações Frigoríficas – Textos de apoio da disciplina, 2009

MALÇA J. *Sistemas de Climatização*, 2010

MAURO Alvaro. Propriedade do Ar Atmosférico [Consult. 14 Fev. 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://pt.scribd.com/doc/232768607/2-propriedades-Do-Ar-Atmosferico>>;

2006

OGAWA Arthur. Diagrama psicrométricos [Consult. 18 Mar. 2014]. WWW:<URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Psychrometrics#mediaviewer/File:PsychrometricChart.SeaLevel.SI.svg>>; 2009

STOECKER WF – *Industrial Refrigeration Handbook*, McGraw-Hill, 1998. ISBN: 0-070-61623-X

SANTOS L. *Psicrometria*, 2011

STULL Roland. Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature [Consult. 14 Fev. 2014]. Disponível em WWW:<URL: <https://wiki.engr.illinois.edu/download/attachments/45842726/Stull+2011+-+Wet+Bulb+from+RH+and+T.pdf?version=1&modificationDate=1359651680000>>; 2011

S.A. Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature [Consult. 14 Fev. 2014]. Disponível em WWW:<URL: <https://wiki.engr.illinois.edu/download/attachments/45842726/Stull+2011+Wet+Bulb+from+RH+and+T.pdf?version=1&modificationDate=1359651680000>>; 2011

THOME JR. Engineering Data Book III. [Em linha] Wolverine Tube, Inc, [Consult. 15 Fev. 2014]. Disponível em WWW:<URL: [www.wlv.com/wp-content/uploads/2014/06/databook3/data/db3ch13.pdf](http://www.wlv.com/wp-content/uploads/2014/06/databook3/data/db3ch13.pdf)>; 2004

Vaisala, humidity conservation Formulas [Consult. 23 Jan. 2014]. WWW:<URL: [http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/Humidity\\_Conversion\\_Formulas\\_B210973EN-F.pdf](http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/Humidity_Conversion_Formulas_B210973EN-F.pdf)>; 2013







**Anexo 1. Manual da aplicação de perda de carga para  
sistemas de glicol**





## **Glycol pressure drop application**

**Nuno Alves**

**Leeds, 2014**



Branch		
A	B	
Stop valves	Kl	How many
Ball valves	0.05	2
Globe valves	10	
Butterfly valves	0.3	

Other valves	Kl	How many
Double regulating valves		
Three prt valves		

Misc items	Kl	How many
Filter	0.23	
Non return valve(hinged)	2	1
Non return valve(spring)	4	
45 Elbow	0.4	
90 Elbow	1.5	4
Equal tee	1.8	
Branch tee	0.45	
Reduces	0.15	
Orifice plate		
Saoenoid valve		

Total Kl	8.1
----------	-----

Please, insert how many elements present in the branch

K Factors Sum	K Factors Sum
Calculated K Factors	8.1
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0
Calculated K Factors	0

You can check if the was made checking in the “K Factors Sum” column

### Volume in others elements

The program allow you to introduce the volume of glycol in other elements such as, coolers and AHU. This volume will be automatically added in the Total volume of the system.

Volume of glycol in others elements	
Name of the element	Total volume inside [m3]
Cooler 1 - internal glycol volume	0.3
Total	0.3

Example of the introduction of the "Total volume inside other elements"

<b>TOTAL without safety</b>	<b>0.000</b>	<b>0.300</b>
<b>Safety (%)</b>	25%	25%
<b>TOTAL without safety</b>	<b>0.000</b>	<b>0.375</b>

Total Volume only considering the element, 0.3m<sup>3</sup>

### Safety

The values of the pressure drop and volume of glycol can be achieved considering a safety value. That percentage can be choose between 5% and 40%.

### Total pressure drop in the system

In a normal glycol system the pressure drop is not the total in all the branches. This happen because the glycol system is a parallel circuit, so you need to select the "worst path/route" which cause a greater pressure drop. After select all branches of one path you can click in "Assume this case study" and a Report will appear with the pressure drop for that case. Finally the system pressure drop will be the worst case study.

For more explanation please consult the next pages, which explain an example case.

### Pump selection

In order to select a glycol pump you only need to have 2 variables, which are:

- Head [bar] : Pressure drop (in the worst case)
- Biggest value of mass flow (kg/s)

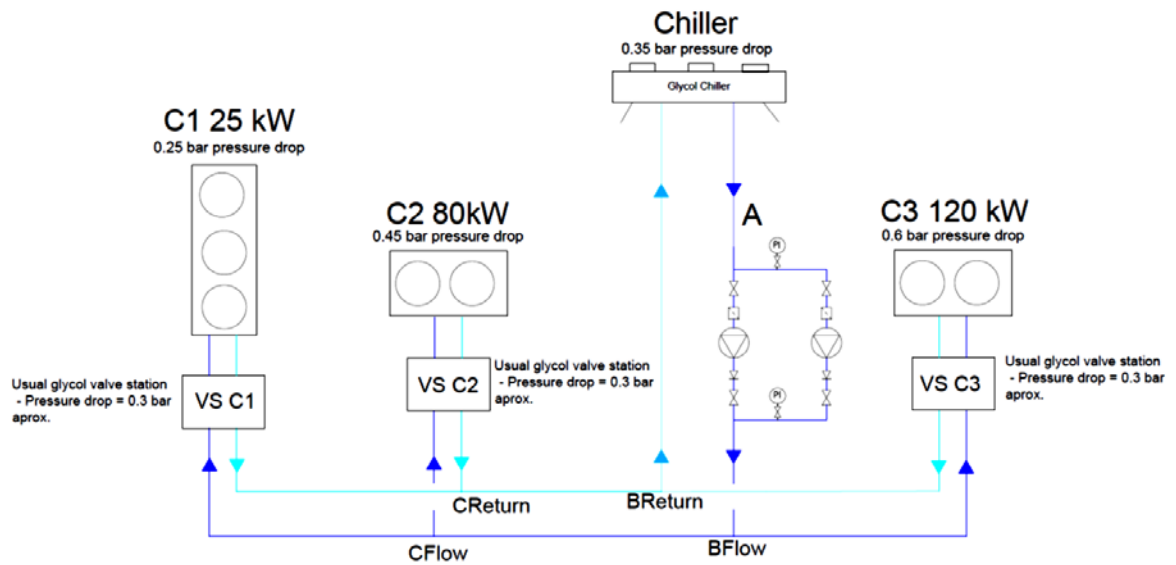
Knowing this values you can easily select a glycol pump for the system.

For more explanation you please consult the next pages, which explain an example case.

### Example Case

The next figure represent a schematic of an example glycol installation. Following the drawing and assuming example values we will use the programme to select a glycol pump and found the glycol charge of the system.





Following the drawing the table present in the next page was filled.

The following values were assumed:

- 0.3 bar pressure drop in the glycol valve stations
- 0.25 bar pressure drop in cooler 1 (C1)
- 0.45 bar pressure drop in cooler 2 (C2)
- 0.6 bar pressure drop in cooler 3 (C3)
- 0.35 bar pressure drop in the chiller
- Glycol volume inside cooler 1 =  $0.12 \text{ m}^3$
- Glycol volume inside cooler 2 =  $0.2 \text{ m}^3$
- Glycol volume inside cooler 3 =  $0.3 \text{ m}^3$
- Glycol volume inside the chiller =  $0.53 \text{ m}^3$
- 25% safety
- Maximum velocity of 1.5 m/s
- Example values of the lengths and K factors were assumed as example.

## Example application table

Branch		Glycol [%]	Length [m]	Duty [kW]	% Duty	Inlet Temp. [°C]	Outlet Temp. [°C]	Roughness of stainless steel [mm]	Real Velocity [m/s]	Status	Max. Velocity [m/s]	Mass flow [kg/s]	Necessary diameter [mm]	Real diameter [DN]	K Factors Sum	K Factors Sum	Others located pressure drops [bar]	Total pressure drop [bar]	Total pressure drop [bar]	Total volume in the pipes [m³]		
A	B Flow	35	10	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	Ok	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	8.5		0.0770		0.000	0.1227	
B	B Flow																					
C	C Flow	35	15	105	47%	-8	-4	0.015	1.367	Ok	1.500	7.095	76.375	80	Calculated K Factors	8.6		0.1163		0.000	0.0754	
C	C Flow																					
V5	V5 C1	35	25	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	Ok	1.500	1.689	37.267	40	Calculated K Factors	12		0.2373		0.000	0.0314	
V5	V5 C1																					
C	C Flow	35	20	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	Ok	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5	0.3	0.3861		0.000	0.0101	
C	C Flow																					
V5	V5 C2	35	10	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	Ok	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5	0.3	0.3535		0.000	0.0503	
V5	V5 C2																					
B	B Flow	35	20	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	Ok	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	12		0.1016		0.000	0.1571	
V5	V5 C3	35	8	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	Ok	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	5	0.3	0.3417		0.000	0.0628	
C3	V5 C3	35	8	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	Ok	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	5	0.6	0.6417		0.000	0.0628	
C2	V5 C2	35	10	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	Ok	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5	0.45	0.5035		0.000	0.0503	
C1	V5 C1	35	8	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	Ok	1.500	1.689	37.267	40	Calculated K Factors	5	0.25	0.3361		0.000	0.0101	
V5	V5 C1																					
V5	V5 C1	C Return	35	25	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	Ok	1.500	1.689	37.267	40	Calculated K Factors	12		0.2373		0.000	0.0314
V5	V5 C2	C Return	35	20	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	Ok	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5		0.0789		0.000	0.1005
V5	V5 C3	B Return	35	20	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	Ok	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	12		0.1016		0.000	0.1571
C	C Return	35	15	105	47%	-8	-4	0.015	1.367	Ok	1.500	7.095	76.375	80	Calculated K Factors	8.6		0.1163		0.000	0.0754	
B	B Return	35	23	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	Ok	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	7		0.0839		0.000	0.2823	
Chiller	Chiller	35	23	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	Ok	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	7		0.0839		0.000	0.2823	
Chiller	A	35	10	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	Ok	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	6	0.35	0.4085		0.000	0.1227	
		35			0%	-8	-4	0.015	1.200	Ok					Calculated K Factors	0				0.000	0.0000	
		35			0%	-8	-4	0.015							Calculated K Factors	0				0.000	0.0000	
		35			0%	-8	-4	0.015							Calculated K Factors	0				0.000	0.0000	
		35			0%	-8	-4	0.015							Calculated K Factors	0				0.000	0.0000	
																		TOTAL without safety	0.000	2.653		
																		Safety (%)	25%			
																		TOTAL without safety	0.000	3.316		

Extend lines

Hide lines

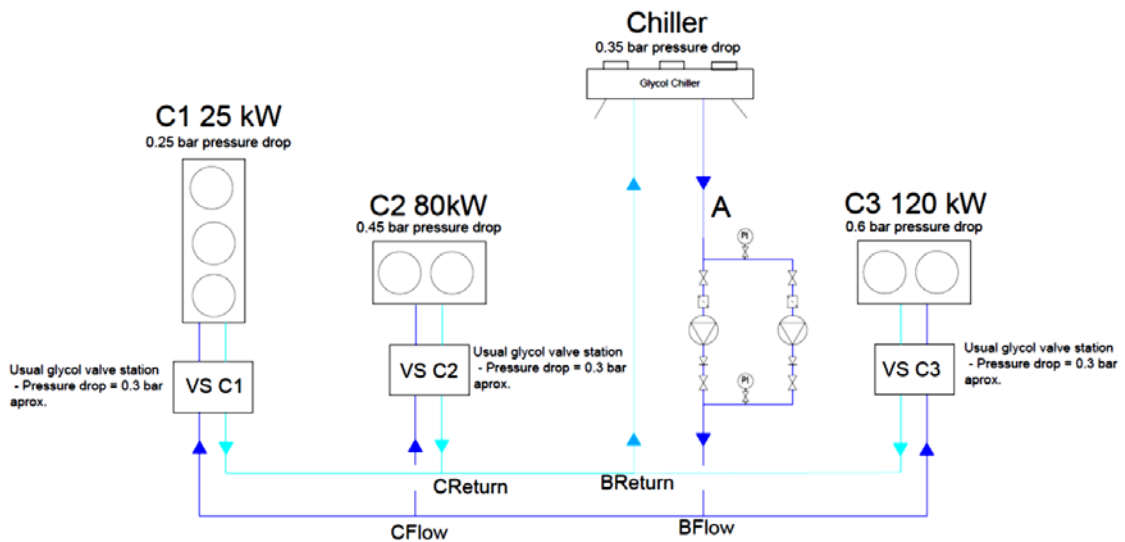
Clean

Volume of glycol in others elements	
Name of the element	Total volume inside [m³]
Glycol volume inside cooler 1	0.12
Glycol volume inside cooler 2	0.2
Glycol volume inside cooler 3	0.3
Glycol volume inside glycol chiller	0.53
	</

Considering the table we can assumed that the glycol charge in the system is 2.65m<sup>3</sup>, or 3.32 m<sup>3</sup> considering a safety of 25%.

We also know that the max mass flow is 15.2kg/s, which is approximately 14.62 L/s, considering a glycol density of 1040kg/m<sup>3</sup>.

## Pressure drop calculation



Observing the drawing we can conclude that there are 3 different paths, which need to be considering in order to calculate the worst case, therefore the system pressure drop.

The 3 paths are:

- 1<sup>st</sup>: From chiller to Cooler 1
- 2<sup>nd</sup>: From chiller to Cooler 2
- 3<sup>rd</sup>: From chiller to Cooler 3

Selecting the different branches of the 1<sup>st</sup> path we conclude that the pressure drop in this case is 2 bar or 2.5 bar with a safety of 25%, as shown in the next picture.

Branch		Glycol [%]	length [m]	Duty [kW]	% Duty	Inlet Temp. [°C]	Out Temp. [°C]	Roughness of stainless steel [mm]	Real Velocity [m/s]	Status	Max. Velocity [m/s]	Mass flow [kg/s]	Necessary diameter [mm]	Real diameter [DN]	K Factors Sum	K Factors Sum	Others located pressure drops [bar]	Total pressure drop [bar]	Total pressure drop [bar]	Total volume in the pipes [m3]
A	B Flow	35	10	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	OK	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	8.5		0.0770	0.077	0.1227
B Flow	C Flow	35	15	105	47%	-8	-4	0.015	1.367	OK	1.500	7.095	76.375	80	Calculated K Factors	8.6		0.1163	0.116	0.0754
C Flow	VS C1	35	25	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	OK	1.500	1.689	37.267	40	Calculated K Factors	12		0.2373	0.237	0.0314
VS C1	C1	35	8	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	OK	1.500	1.689	37.267	40	Calculated K Factors	5	0.3	0.3861	0.386	0.0101
C Flow	VS C2	35	20	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	OK	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	8		0.0957	0.095	0.1005
VS C2	C2	35	10	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	OK	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5	0.3	0.3535	0.353	0.0503
B Flow	VS C3	35	20	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	OK	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	12		0.1016	0.101	0.1571
VS C3	C3	35	8	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	OK	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	5	0.3	0.3417	0.341	0.0628
C3	VS C3	35	8	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	OK	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	5	0.6	0.6417	0.642	0.0628
C2	VS C2	35	10	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	OK	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5	0.45	0.5035	0.503	0.0503
C1	VS C1	35	8	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	OK	1.500	1.689	37.267	40	Calculated K Factors	5	0.25	0.3361	0.336	0.0101
VS C1	C Return	35	25	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	OK	1.500	1.689	37.267	40	Calculated K Factors	12		0.2373	0.237	0.0314
VS C2	C Return	35	20	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	OK	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5		0.0789	0.079	0.1005
VS C3	B Return	35	20	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	OK	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	12		0.1016	0.101	0.1571
C Return	B Return	35	15	105	47%	-8	-4	0.015	1.367	OK	1.500	7.095	76.375	80	Calculated K Factors	8.6		0.1163	0.116	0.0754
B Return	Chiller	35	23	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	OK	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	7		0.0839	0.084	0.2823
Chiller	A	35	10	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	OK	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	6	0.35	0.4085	0.408	0.1227
		35			0%	-8	-4	0.015		OK					Calculated K Factors	0			0.000	0.0000
		35			0%	-8	-4	0.015		OK					Calculated K Factors	0			0.000	0.0000
		35			0%	-8	-4	0.015		OK					Calculated K Factors	0			0.000	0.0000
		35			0%	-8	-4	0.015		OK					Calculated K Factors	0			0.000	0.0000
TOTAL without safety																		1.999	2.653	
Safety (%)																		25%	25%	
TOTAL without safety																		2.498	3.316	

Selecting the different branches of the 2<sup>nd</sup> path we conclude that the pressure drop in this case is 1.83 bar or 2.3 bar with a safety of 25%, as shown in the next picture.

Branch		Glycol [%]	Length [m]	Duty [kW]	% Duty	Inlet Temp. [°C]	Outlet Temp. [°C]	Roughness of stainless steel [mm]	Real Velocity [m/s]	Status	Max. Velocity [m/s]	Mass flow [kg/s]	Necessary diameter [mm]	Real diameter [DN]	K Factors Sum	K Factors Sum	Others located pressure drops [bar]	Total pressure drop [bar]	Total pressure drop [bar]	Total volume in the pipes [m³]
		35																		
A	B Flow	35	10	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	Ok	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	8.5		0.0770	0.077	0.1227
B Flow	C Flow	35	15	105	47%	-8	-4	0.015	1.367	Ok	1.500	7.095	76.375	80	Calculated K Factors	8.6		0.1163	0.116	0.0754
C Flow	VS C1	35	25	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	Ok	1.500	1.689	37.257	40	Calculated K Factors	12		0.2373	0.237	0.0314
VS C1	C1	35	8	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	Ok	1.500	1.689	37.257	40	Calculated K Factors	5	0.3	0.3861	0.386	0.0101
C Flow	VS C2	35	20	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	Ok	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	8		0.0957	0.095	0.1005
VS C2	C2	35	10	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	Ok	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5	0.3	0.3535	0.353	0.0503
B Flow	VS C3	35	20	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	Ok	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	12		0.1016	0.101	0.1571
VS C3	C3	35	8	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	Ok	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	5	0.3	0.3417	0.341	0.0628
C3	VS C3	35	8	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	Ok	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	5	0.6	0.6417	0.642	0.0628
C2	VS C2	35	10	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	Ok	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5	0.45	0.5035	0.503	0.0503
C1	VS C1	35	8	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	Ok	1.500	1.689	37.257	40	Calculated K Factors	5	0.25	0.3361	0.336	0.0101
VS C1	C Return	35	25	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	Ok	1.500	1.689	37.257	40	Calculated K Factors	12		0.2373	0.237	0.0314
VS C2	C Return	35	20	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	Ok	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5		0.0789	0.079	0.1005
VS C3	B Return	35	20	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	Ok	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	12		0.1016	0.101	0.1571
C Return	B Return	35	15	105	47%	-8	-4	0.015	1.367	Ok	1.500	7.095	76.375	80	Calculated K Factors	8.6		0.1163	0.116	0.0754
B Return	Chiller	35	23	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	Ok	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	7		0.0839	0.084	0.2823
Chiller	A	35	10	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	Ok	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	6	0.35	0.4085	0.408	0.1227
		35			0%	-8	-4	0.015	Ok						Calculated K Factors	0		0.000	0.000	0.000
		35			0%	-8	-4	0.015	Ok						Calculated K Factors	0		0.000	0.000	0.000
		35			0%	-8	-4	0.015	Ok						Calculated K Factors	0		0.000	0.000	0.000
		35			0%	-8	-4	0.015	Ok						Calculated K Factors	0		0.000	0.000	0.000
TOTAL without safety																		1.834	2.653	
Safety (%)																		25%	25%	
TOTAL without safety																		2.292	3.316	

Selecting the different branches of the 3<sup>rd</sup> path we conclude that the pressure drop in this case is 1.84 bar or 2.3 bar with a safety of 25%, as shown in the next picture.

Branch		Glycol [%]	Length [m]	Duty [kW]	% Duty	Inlet Temp. [°C]	Outlet Temp. [°C]	Roughness of stainless steel [mm]	Real Velocity [m/s]	Status	Max. Velocity [m/s]	Mass flow [kg/s]	Necessary diameter [mm]	Real diameter [DN]	K Factors Sum	K Factors Sum	Others located pressure drops [bar]	Total pressure drop [bar]	Total pressure drop [bar]	Total volume in the pipes [m³]
		35																		
A	B Flow	35	10	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	Ok	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	8.5		0.0770	0.077	0.1227
B Flow	C Flow	35	15	105	47%	-8	-4	0.015	1.367	Ok	1.500	7.095	76.375	80	Calculated K Factors	8.6		0.1163	0.116	0.0754
C Flow	VS C1	35	25	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	Ok	1.500	1.689	37.267	40	Calculated K Factors	12		0.2373	0.237	0.0314
VS C1	C1	35	8	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	Ok	1.500	1.689	37.267	40	Calculated K Factors	5	0.3	0.3861	0.386	0.0101
C Flow	VS C2	35	20	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	Ok	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	8		0.0957	0.095	0.1005
VS C2	C2	35	10	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	Ok	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5	0.3	0.3535	0.353	0.0503
B Flow	VS C3	35	20	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	Ok	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	12		0.1016	0.102	0.1571
VS C3	C3	35	8	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	Ok	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	5	0.3	0.3417	0.342	0.0628
C3	VS C3	35	8	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	Ok	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	5	0.6	0.6417	0.642	0.0628
C2	VS C2	35	10	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	Ok	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5	0.45	0.5035	0.503	0.0503
C1	VS C1	35	8	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	Ok	1.500	1.689	37.267	40	Calculated K Factors	5	0.25	0.3361	0.336	0.0101
VS C1	C Return	35	25	25	11%	-8	-4	0.015	1.302	Ok	1.500	1.689	37.267	40	Calculated K Factors	12		0.2373	0.237	0.0314
VS C2	C Return	35	20	80	36%	-8	-4	0.015	1.042	Ok	1.500	5.405	66.665	80	Calculated K Factors	5		0.0789	0.079	0.1005
VS C3	B Return	35	20	120	53%	-8	-4	0.015	1.000	Ok	1.500	8.108	81.648	100	Calculated K Factors	12		0.1016	0.102	0.1571
C Return	B Return	35	15	105	47%	-8	-4	0.015	1.367	Ok	1.500	7.095	76.375	80	Calculated K Factors	8.6		0.1163	0.116	0.0754
B Return	Chiller	35	23	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	Ok	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	7		0.0839	0.084	0.2823
Chiller	A	35	10	225	100%	-8	-4	0.015	1.200	Ok	1.500	15.203	111.801	125	Calculated K Factors	6	0.35	0.4085	0.408	0.1227
		35			0%	-8	-4	0.015	Ok						Calculated K Factors	0			0.000	0.0000
		35			0%	-8	-4	0.015	Ok						Calculated K Factors	0			0.000	0.0000
		35			0%	-8	-4	0.015	Ok						Calculated K Factors	0			0.000	0.0000
		35			0%	-8	-4	0.015	Ok						Calculated K Factors	0			0.000	0.0000
TOTAL without safety																		1.835	2.653	
Safety (%)																		25%	25%	
TOTAL without safety																		2.294	3.316	



**Anexo 2. Manual da aplicação de perdas de carga para linha de  
líquido de sistemas de amoníaco**





## **Liquid Ammonia pressure drop application**

**Nuno Alves**

**Leeds, 2014**





## K Factors

After clicking in the hyperlink “Calculate K factors” a windows will open and you can insert the number of elements in that specific branch. After the selection you can return to the main table clicking in the button “Comeback”. Finally you can verify if the selection was made verifying the column “K Factors Sum” (AC5).

Branch		
A	B	
<b>Stop valves</b>	Kl	How many
Ball valves	0.05	2
Globe valves	10	
Butterfly valves	0.3	

<b>Other valves</b>	Kl	How many
Double regulating valves		
Three prt valves		

<b>Misc items</b>	Kl	How many
Filter	0.23	
Non return valve(hinged)	2	1
Non return valve(spring)	4	
45 Elbow	0.4	
90 Elbow	1.5	4
Equal tee	1.8	
Branch tee	0.45	
Reduces	0.15	
Orifice plate		
Saoenoid valve		

Total Kl	8.1
----------	-----

Please, insert the number of elements present in the branch

K Factors Sum	K Factors Sum
<b>Calculated K Factors</b>	8.1
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0
<b>Calculated K Factors</b>	0

You can check if the selection was made, checking in the “K Factors Sum” column

### Volume in others elements

The program allow you to introduce the volume of ammonia inside other elements.

Volume of Ammonia in others elements	
Name of the element	Total volume inside [m <sup>3</sup> ]
Cooler 1 - Internal ammonia volume	0.3
<b>Total</b>	0.3

Example of the introduction of the “Total volume inside other elements”

<b>TOTAL without safety</b>	<b>0.000</b>	<b>0.300</b>
<b>Safety (%)</b>	25%	25%
<b>TOTAL without safety</b>	<b>0.000</b>	<b>0.375</b>

Total Volume only considering the element, 0.3m<sup>3</sup>

### Safety

The values of the pressure drop and volume of ammonia can be achieved considering a safety value. That percentage can be choose between 5% and 40%.

### Total pressure drop in the system

In a normal ammonia system the pressure drop is not the same in all the branches. This happen because the system is a parallel circuit, so you need to select the “worst path/route” which cause a greater pressure drop. After selected all branches of one path you can click in “Assume this case study” and a Report will appear with the pressure drop for that case. Finally the system pressure drop will be the worst case study.

For more explanation please consult the next pages, which explain an example case.

### Pump selection

In order to select an ammonia pump you only need to have 2 variables, which are:

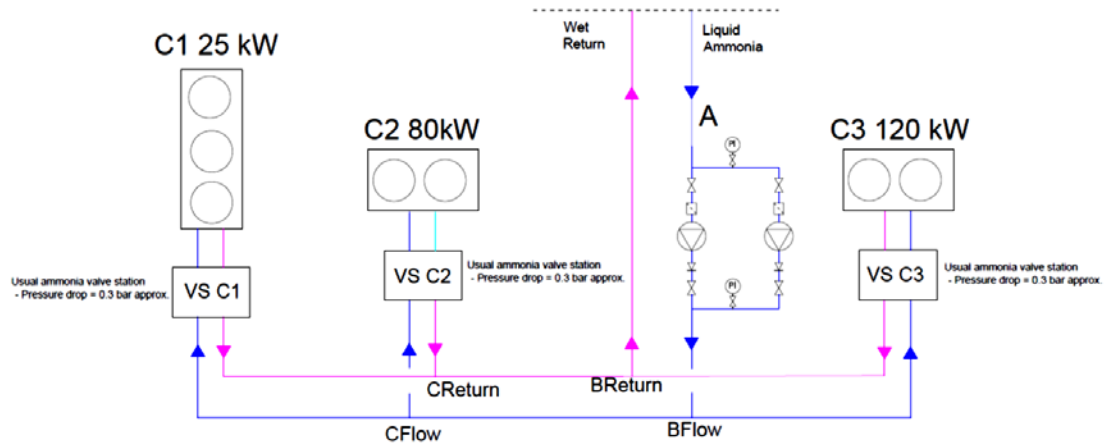
- **Head [bar]** : Pressure drop (in the worst case)
- Biggest value of mass flow (kg/s)

Knowing this values you can easily select an ammonia pump for the system.

For more explanation you please consult the next pages, which explain an example case.

## Example Case

The next figure represent a schematic of an example ammonia installation. Following the drawing and assuming example values we will use the programme to select an ammonia pump and found the refrigerant charge of the system.



Following the drawing the table present in the next page was filled.

The following values were assumed:

- 0.3 bar pressure drop in the ammonia valve stations
- Ammonia charge inside cooler 1 =  $0.12 \text{ m}^3$
- Ammonia charge inside cooler 2 =  $0.2 \text{ m}^3$
- Ammonia charge inside cooler 3 =  $0.3 \text{ m}^3$
- 25% safety
- Maximum velocity of 1 m/s
- Example values of the lengths and K factors were assumed as example.

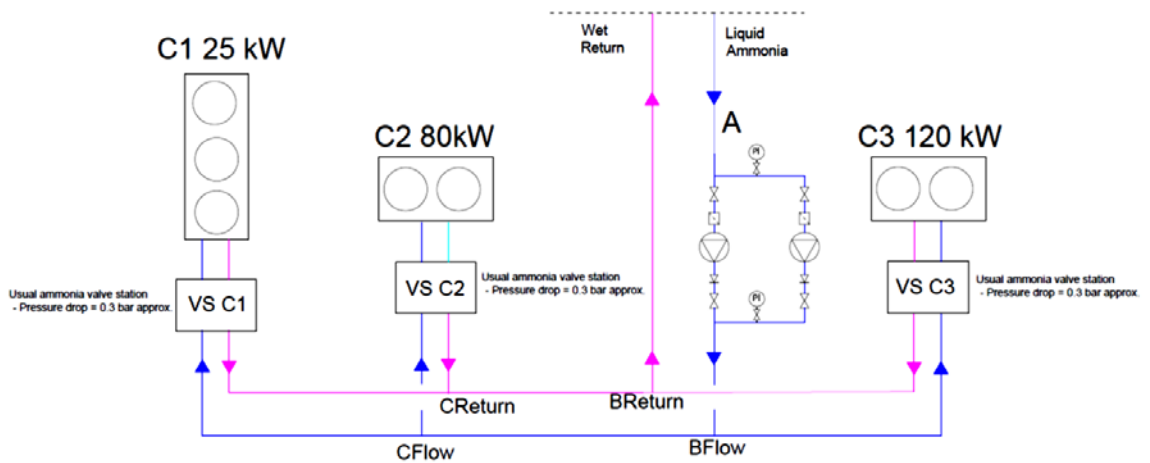
### Example application table

Branch	Length [m]	Duty [kW]	% Duty	T [°C]	Roughness of the pipe [mm]	Real Velocity [m/s]	Status	Max. Velocity [m/s]	Mass flow [kg/s]	Enthalpy [kJ.Kg <sup>-1</sup> ]	Necessary diameter [mm]	Real diameter [DN]	Continuous pressure drop (Darcy formula) [bar]	K Factors Sum	K Factors	Localized pressure drop (Darcy formula) [bar]	Others located pressure drops [bar]	Total pressure drop [bar]	Total volume in the pipes [m <sup>3</sup> ]	
A	B Flow	10	225	100%	-40	0.05	Ok	1.00	0.646	1392.5	35.040	40	0.0225	Calculated K Factors	8.5	0.017	0.000	0.000	0.0126	
B	C Flow	15	105	47%	-40	0.05	Ok	1.00	0.302	1392.5	23.937	25	0.0559	Calculated K Factors	8.6	0.024	0.000	0.000	0.0074	
C	Flow	V5 C1	25	25	11%	-40	0.05	0.606	Ok	1.00	0.072	1392.5	11.680	15	0.2189	Calculated K Factors	12	0.015	0.000	0.0044
V5 C1	C1	8	25	11%	-40	0.05	0.606	Ok	1.00	0.072	1392.5	11.680	15	0.0701	Calculated K Factors	5	0.006	0.300	0.000	0.0014
C	Flow	V5 C2	20	30	36%	-40	0.05	0.698	Ok	1.00	0.230	1392.5	20.894	25	0.0853	Calculated K Factors	8	0.013	0.000	0.0028
V5 C2	C2	10	30	36%	-40	0.05	0.698	Ok	1.00	0.230	1392.5	20.894	25	0.0427	Calculated K Factors	5	0.008	0.300	0.000	0.0049
B	Flow	V5 C3	20	120	53%	-40	0.05	0.639	Ok	1.00	0.345	1392.5	25.590	32	0.0653	Calculated K Factors	12	0.016	0.000	0.0161
V5 C3	C3	8	120	53%	-40	0.05	0.639	Ok	1.00	0.345	1392.5	25.590	32	0.0261	Calculated K Factors	5	0.007	0.300	0.000	0.0064
Surge Drum	A	10	225	100%	-40	0.05	0.767	Ok	1.00	0.646	1392.5	35.040	40	0.0225	Calculated K Factors	6	0.012	0.350	0.000	0.0126
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	
			0%	-40	0.05	0.000	Ok	1.00	0.000	1392.5	0.000	15	0.0000	Calculated K Factors</						

Considering the table we can assumed that the liquid ammonia charge in the liquid line is  $0.976\text{m}^3$ , or  $1.22\text{m}^3$  considering a safety of 25%.

We also know that the max mass flow is 0.64kg/s, which is approximately 0.88 L/s, considering an ammonia density of 730kg/m<sup>3</sup> and a recirculation ratio of 1:4.

## Pressure drop calculation



Observing the drawing we can conclude that there are 3 different paths, which need to be considering in order to calculate the worst case, therefore the system pressure drop.

The 3 paths are:

- 1<sup>st</sup>: From the surge drum to Cooler 1
- 2<sup>nd</sup>: From surge drum to Cooler 2
- 3<sup>rd</sup>: From surge drum to Cooler 3

Selecting the different branches of the 1<sup>st</sup> path we conclude that the pressure drop in this case is 1.15 bar or 1.4 bar with a safety of 25%, as shown in the next picture.

Selecting the different branches of the 2<sup>nd</sup> path we conclude that the pressure drop in this case is 0.953 bar or 1.19 bar with a safety of 25%, as shown in the next picture.

Selecting the different branches of the 3<sup>rd</sup> path we conclude that the pressure drop in this case is 0.84 bar or 1.05 bar with a safety of 25%, as shown in the next picture.

Finally we concluded that the 1<sup>st</sup> path (surge drum to Cooler 1) is the worst case and the pressure drop is 1.4 bar with 25% safety.

**Ammonia**  
**Flow:** 0.88 L/s  
**Head:** 1.4 bar, which is equals to 19.55 meters of ammonia, considering a density of 730kg/m<sup>3</sup>.

**Note**

- If a cooler is in a level above the pump, we need to consider the pressure drop due to the height differences because the liquid ammonia is not a closed circuit.
- For example, if a cooler is 10 meters above the pump we need to calculate the pressure drop, using the following formula:-

$$p = d \times g \times h$$

$$p = 730 \times 9.82 \times 10$$

$$p = 71613 \text{ Pa} = 0.716 \text{ bar}$$

**Where:**

P = Pressure in Pascal

G = Gravitational acceleration (9.82m/s<sup>2</sup>)

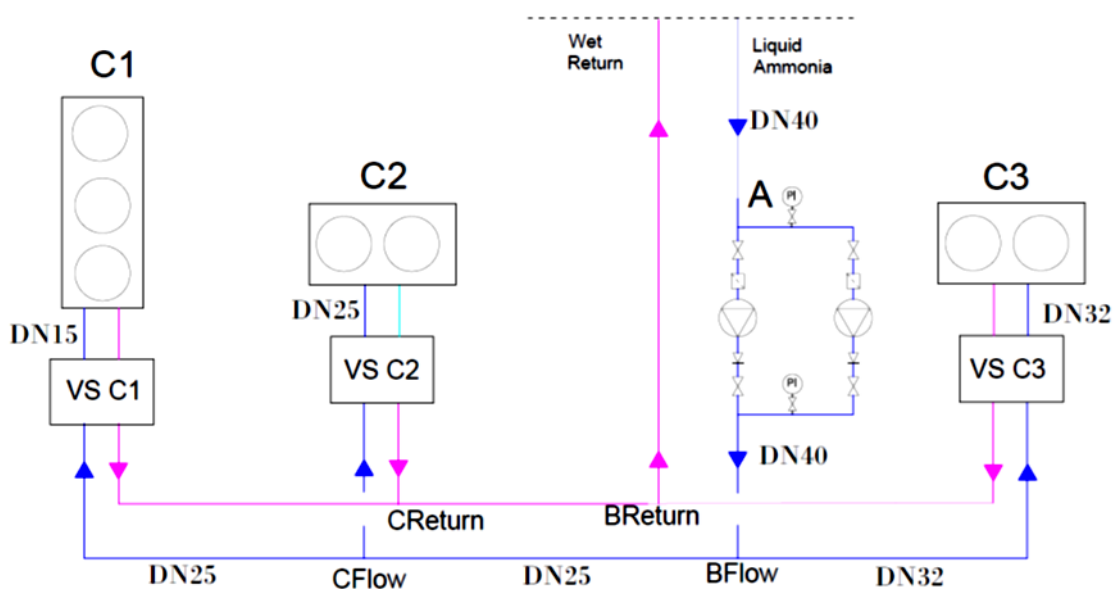
d = Ammonia density (730kg/m<sup>3</sup>)

h = height in meters

We must add this value to the previous calculation. So, the pump selection will be the following:

- **Ammonia**
- **Flow:** 0.88 L/s
- **Head:** 2.12 bar, which is equal to 29.55 meters of ammonia, considering a density of 730kg/m<sup>3</sup>.

The pipe sizes in each branch will be the following, considering a maximum velocity of 1.0 m/s:-



**Anexo 3. Manual da aplicação de perda de carga para linha de  
retorno de sistemas de refrigeração de amoníaco (mistura  
bifásica líquido/vapor)**







## **Wet Return - Ammonia pressure drop application**





















**Nuno Alves**

**Leeds, 2014**



## Fittings and valves

After the diameter selection the program will open a window where you can introduce the fittings and valves present in each branch. The table is from the ASHRAE Refrigeration Book.

NOMINAL Pipe tube size (mm)	Smooth bend Elbows						Flow Through Branch	Smooth Bend Tees			Sudden Enlargement, d/D			Sudden Contraction, d/D			Sharp Edge		Pipe Projection		Valves Losses in Equivalent Metres of pipe							
	90° Std <sup>a</sup>	90° Long Radius <sup>a</sup>	90° Street <sup>a</sup>	45° Std <sup>a</sup>	45° Street <sup>a</sup>	180° Std <sup>a</sup>		Staight Through Flow	No Reduction	Reduced 1/4	Reduced 1/2	1/4	1/2	3/4	1/4	1/2	3/4	Entrance	Exit	Entrance	Exit	Globe <sup>a</sup>	60° Wye	45° Wye	Rectangular Valve Angle <sup>a</sup>	Gate <sup>b</sup>	Swing Check <sup>c</sup>	Lift Check
																												
How many?	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0

OK

Please, insert the number of elements and press OK to return to the main windows. The application will assume this values and make a new calculation.

## Safety

The values of the pressure and temperature drop can be achieved considering a safety value. That percentage can be choose between 5% and 40%.

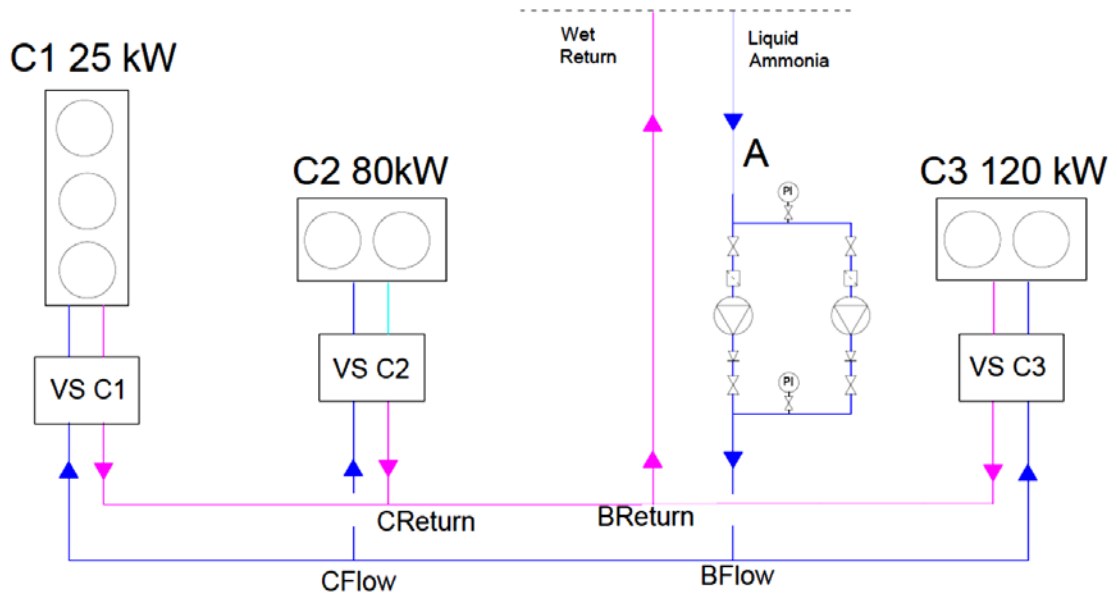
## Total pressure/temperature drop in the system

In a normal ammonia system the pressure drop is not the total in all the branches. This happen because the ammonia system is a parallel circuit, so you need to select the “worst path/route” which cause a greater pressure/temperature drop.

For more explanation please consult the next pages, which explain an example case.

## Example Case

The next figure represent a schematic of an example ammonia installation. Following the drawing and assuming example values we will use the programme to calculate the pressure/temperature drop between a cooler and the surge drum and the pipe size selection.

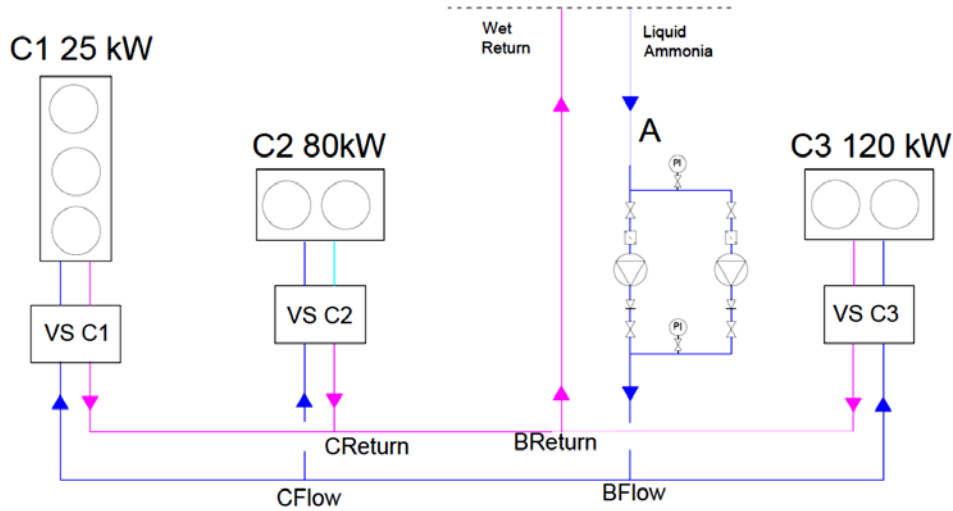


Following the drawing the table present in the next page was filled.

The following values were assumed:

- 30% safety
- Circulation ratio 1:4
- Vapour quality : 30%
- Maximum temperature drop allowed 1K (between the coolers and surge drum)
- Valves and fittings were assumed as example.

### Example application table



Observing the drawing we can conclude that there are 3 different paths, which need to be considering in order to calculate the worst case, therefore the system pressure drop.

The 3 paths are:

- 1<sup>st</sup>: From Cooler 1 to the surge drum
- 2<sup>nd</sup>: From Cooler 2 to the surge drum
- 3<sup>rd</sup>: From Cooler 3 to the surge drum

Selecting the different branches of the 1<sup>st</sup> path we conclude that the temperature drop in this case is 0.6 K or 0.77 K with a safety of 30%, as shown in the next picture.

[illegible]

Selecting the different branches of the 2<sup>nd</sup> path we conclude that the temperature drop in this case is 0.57 K or 0.75 K with a safety of 30%, as shown in the next picture.

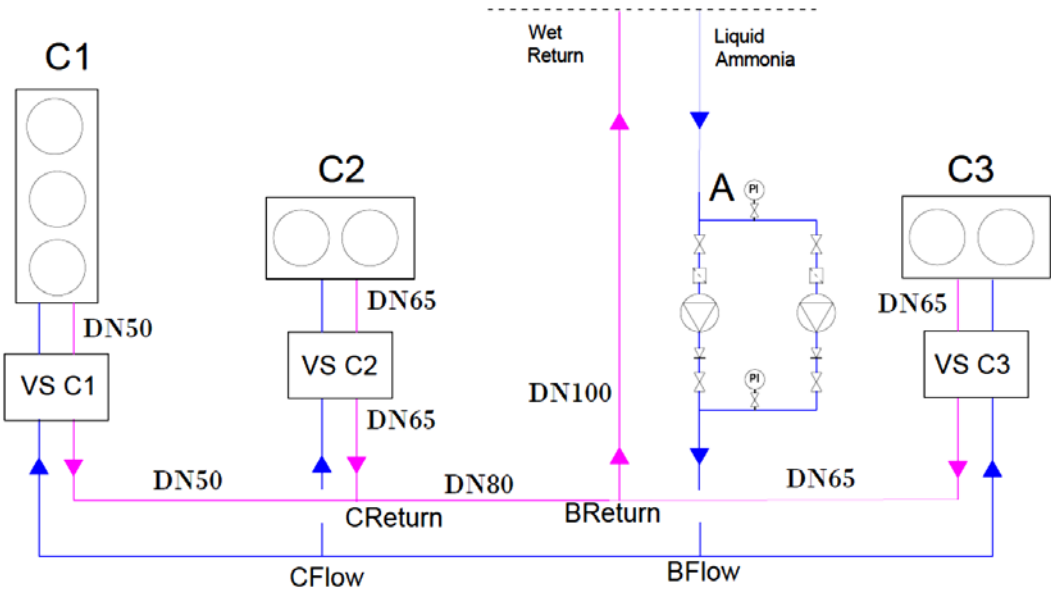
Branch		Length [m]	Duty [kW]	% Duty	Temperature [°C]	× [%]	$V_L$ [m³/kg]	$V_g$ [m³/kg]	$\rho_L$ [kg/m³]	$\rho_g$ [kg/m³]	H [m]	Mass flow [kg.s⁻¹ m³]	$h_{fg}$ [kJ/kg]	Diameter [DN]	$\Delta p_{frict}$ [bar]	$\Delta p_{static}$ [bar]	$\Delta p_{total}$ [bar]	$\Delta T_C$ [K or °C]	$\Delta T_C$ Total [K or °C]	$\Delta p_{total}$ [bar]
B Return	A	10	225	100%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898	6	87.917	1303.4	100	0.0007575496	0.0021	0.0089	0.1113	<input checked="" type="checkbox"/> 0.111	0.009
C Return	B Return	15	105	49%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898		64.106	1303.4	80	0.0002605387	0.0000	0.0083	0.1060	<input checked="" type="checkbox"/> 0.106	0.008
C1	V5 C1	25	25	11%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898	2	39.074	1303.4	50	0.0114980067	0.0007	0.0122	0.1434	<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
V5 C2	C Return	8	25	11%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898		39.074	1303.4	50	0.0036791621	0.0000	0.0037	0.0647	<input checked="" type="checkbox"/> 0.065	0.004
V5 C2	V5 C2	20	80	36%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898	2	73.967	1303.4	65	0.0171395006	0.0007	0.0178	0.1922	<input checked="" type="checkbox"/> 0.192	0.018
C3	B Return	10	80	36%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898		73.967	1303.4	65	0.0005697503	0.0000	0.0085	0.1087	<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
C3	V5 C3	8	120	53%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898		110.981	1303.4	65	0.0122915291	0.0000	0.0123	0.1423	<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
A	Surge Drum	10	225	100%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898	2	87.917	1303.4	100	0.0007575496	0.0007	0.0075	0.0987	<input type="checkbox"/> 0.000	0.007
V5 C1	C Return	25	25	11%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898		39.074	1303.4	50	0.0114980067	0.0000	0.0115	0.1351	<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0					<input type="checkbox"/> 0.000	0.0

Selecting the different branches of the 3<sup>rd</sup> path we conclude that the temperature drop in this case is 0.46 K or 0.6 K with a safety of 30%, as shown in the next picture.

Branch		Length [m]	Duty [kW]	% Duty	Temperature [°C]	x [%]	V <sub>L</sub> [m³/kg]	V <sub>g</sub> [m³/kg]	ρ <sub>L</sub> [kg/m³]	ρ <sub>g</sub> [kg/m³]	H [m]	Mass flow [kg.s <sup>-1</sup> .m²]	h <sub>fg</sub> [kJ/kg]	Diameter [DN]	Δ <sub>p</sub> fric [bar]	Δ <sub>p</sub> static [bar]	Δ <sub>p</sub> total [bar]	ΔT <sub>C</sub> [K or °C]	ΔT <sub>C</sub> Total [K or °C]	Δ <sub>p</sub> total [bar]
B Return	A	10	225	100%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898	6	87.917	1303.4	100	0.0067575496	0.0021	0.0089	0.1113	0.111	0.009
C Return	B Return	15	105	47%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898		64.106	1303.4	80	0.0082605387	0.0000	0.0083	0.1660	0.000	0.000
C1	VS C1	25	25	11%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898	2	39.074	1303.4	50	0.0114980067	0.0007	0.0122	0.1414	0.000	0.000
VS C2	C Return	8	25	11%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898		39.074	1303.4	50	0.0036793521	0.0000	0.0037	0.0647	0.000	0.000
C2	VS C2	20	80	39%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898	2	73.987	1303.4	65	0.0171395006	0.0007	0.0178	0.1922	0.000	0.000
VS C3	B Return	10	80	39%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898		73.987	1303.4	65	0.0085697503	0.0000	0.0086	0.1687	0.009	0.009
C3	VS C3	8	120	53%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898		110.981	1303.4	65	0.0122935293	0.0000	0.0123	0.1423	0.012	0.012
A	Surge Drum	10	225	100%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898	2	87.917	1303.4	100	0.0067575496	0.0007	0.0075	0.0987	0.099	0.007
VS C1	C Return	25	25	11%	-12	25.00%	0.001527	0.4516	654.878847	2.21434898		39.074	1303.4	50	0.0114980067	0.0000	0.0115	0.1351	0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0				0.000	0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0				0.000	0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0				0.000	0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0				0.000	0.000	0.000
				0%	-12	25.00%								0				0.000	0.000	0.000
Ratio 1 : 4															Total without safety		0.461		0.037	
															Safety		30%		25%	
															Total with safety		0.599		0.046	

Finally we concluded that the 1<sup>st</sup> path (Cooler 1 to the surge drum) is the worst case and the temperature drop is 0.7K.

The pipe sizes in each branch will be the following, considering a 0.7K temperature drop. A smaller pipe size could be selected but the temperature drop would increase.



**Anexo 4. Manual da aplicação de perda de carga para  
linha de vapor sobreaquecido referente à sucção e  
descarga do compressor.**







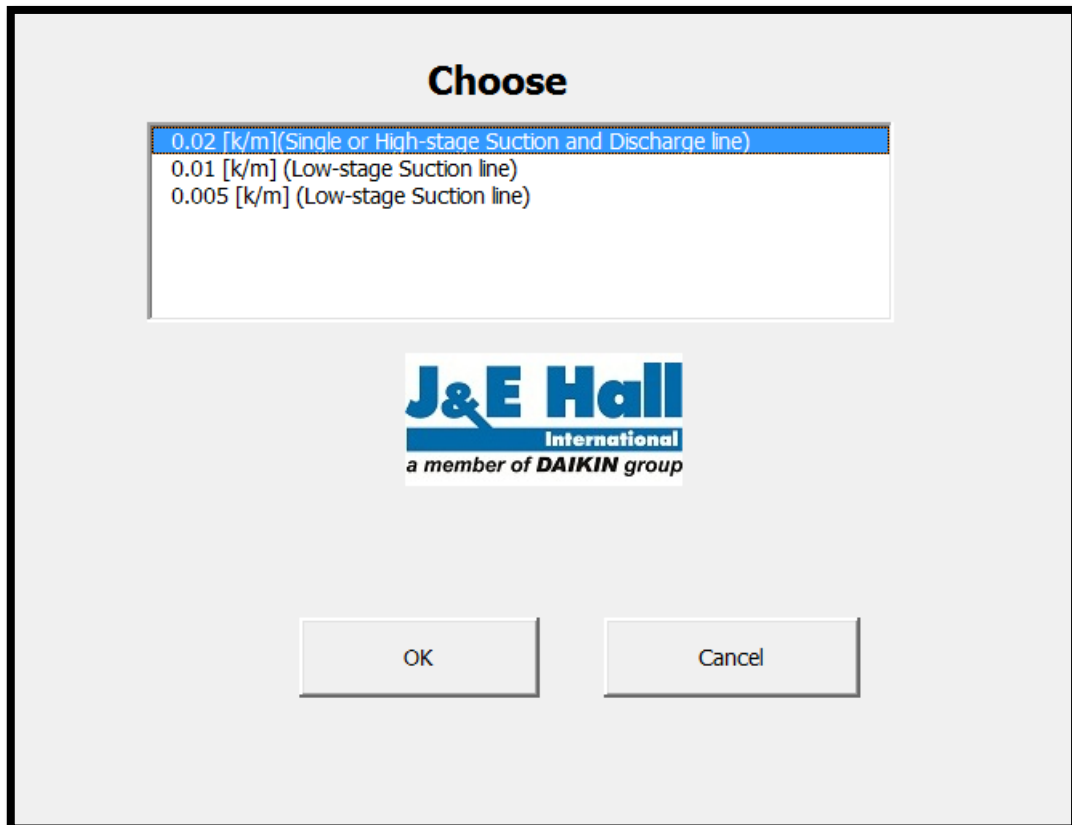
## **Ammonia vapour – Pipe sizing (Suction and discharge line)**

**Nuno Alves**

**Leeds, 2014**

The ammonia vapour (suction and discharge line) pipe sizing was made following tables and diagrams from ASHRAE Refrigeration Book. This manual allow the pipe sizing for 3 different situations, which are:

- Single or high-stage suction and discharge line
- Low Stage Suction Line (considering 0.01 K/m)
- Low Stage Suction Line (considering 0.005 K/m)



**1<sup>st</sup> Selection table:** This selection windows allow to the selection between the 3 different situations.

**Introduction:**

- This application was developed following the ASHRAE tables for ammonia vapour and allows the pipe sizing and the calculation of the temperature drop.

In order to calculate the pressure/temperature drop you can assume the recommended diameter given by the table or a diameter introduced by you.



- **Selection box:**

1. Following the ASHRAE tables the application selects the recommended diameter and calculates the pressure/temperature drop, considering that diameter. In addition it allows the selection of another diameter and the calculation of the pressure/temperature drop considering that size. As expected a bigger selected diameter will result in a smaller temperature drop and a smaller one will result in a bigger pressure drop. In this box you can select what diameter you want considerer, the recommended or the introduced by you. The application only allows the selection of one, if you select 2 diameters an error in the status column will appear.

**Important outputs:**

10. **Recommended diameter by the table (DN)** – Considering the input values (duty, temperature and velocity) the program will calculate the diameter for that pipe branch, following the ASHRAE tables.
11. **Temperature drop considering the recommended diameter by ASHRAE [K]** – The application will calculate the temperature drop considering the diameter given by the ASHRAE table.
12. **Temperature drop considering the introduced diameter [K]** – The ASHRAE table provides a formula which allow the calculation of the temperature drop considering another diameter. In this column the application will show the temperature drop value, calculated following that table.

## Fittings and valves

After the diameter selection, the program will open a window where you can introduce the fittings and valves present in each branch. The table is from the ASHRAE Refrigeration Book.

NOMINAL Pipe tube size [mm]	Smooth bend Elbows						Flow Through Branch	Smooth Bend Tees			Sudden Enlargement, d/D			Sudden Contraction, d/D			Sharp Edge		Pipe Projection		Valves Losses in Equivalent Metres of pipe						
	90° Std <sup>a</sup>	90° Long Radius <sup>a</sup>	90° Street <sup>a</sup>	45° Std <sup>a</sup>	45° Street <sup>a</sup>	180° Std <sup>a</sup>		No Reduction	Reduced 1/4	Reduced 1/2	1/4	1/2	3/4	1/4	1/2	3/4	Entrance	Exit	Entrance	Exit	Globe <sup>a</sup>	60° Wye	45° Wye	Angle <sup>a</sup>	Gate <sup>b</sup>	Swing Check <sup>c</sup>	Lift Check
How many?	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0

OK

Please, insert the number of elements and press OK to return to the main windows. The application will assume this values and make a new calculation.

## How to use the programme (step by step)

1<sup>st</sup> – Choose 1 of the 3 options given in the 1<sup>st</sup> table:

- Single or high-stage suction and discharge line
- Low Stage Suction Line (considering 0.01 K/m)
- Low Stage Suction Line (considering 0.005 K/m)

2<sup>nd</sup> – Insert the duty of the branch considered.

3<sup>rd</sup> – Insert the length of the branch considered.

4<sup>th</sup> – Please insert the evaporation temperature.

5<sup>th</sup> – Please insert the condensing temperature.

6<sup>th</sup> – The application will open a new window. Please insert the number of valves and fittings present in branch and click “Done”.

7<sup>th</sup> – The application will calculate the temperature drop, considering the recommended diameter and the input values. You can see the recommended diameter and the temperature drop in the branch.

8<sup>th</sup> – If you want to consider another diameter, please insert it in the column (“Test other diameter/DN”).

9<sup>th</sup> – Now the programme will calculate the temperature drop considering the introduced diameter. You can see the recommended diameter and the temperature drop in the branch, considering the inserted diameter.

10<sup>th</sup> – For this branch please select in the selection box if you want to consider the diameter given by the table or the introduced diameter. You must select only one diameter, and the respective temperature drop will be appear in “Total”.

11<sup>th</sup> – Please repeat the steps 2 to 10 again, but now considering other branches.

[illegible]

**Anexo 5. Cálculos intermédios realizados pelo aplicativo  
informático de glicol**





### Valores de entrada gerais

Percentagem de glicol [%]

Velocidade máxima [m/s]

Material da tubagem  
(Determinação do valor de rugosidade [mm])

Temperatura do glicol à entrada dos evaporadores [°C]

Temperatura do glicol à saída dos evaporadores [°C]

### Valores de entrada do troço considerado

Comprimento da tubagem [m]

Potência calorífica [kW]

Outras perdas de carga [bar]

Elementos presentes na tubagem (cálculo de KI)

#### 1º - Cálculo do caudal mássico

$$\dot{m} [kg/s] = \frac{P}{cp_2 \times T_2 - cp_1 \times T_1}$$

#### 2º - Cálculo do caudal volúmico

$$\dot{V} [m^3/s] = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

#### 3º - Cálculo do diâmetro interno

$$\phi_i [mm] = 1000 \times \sqrt{\frac{4 \times \dot{V}}{u \times \pi}}$$

#### 4º - Cálculo do diâmetro interno normalizado

$$\phi_{i \text{ normalizado}} = \phi_i - 2 \times \text{thickness}$$

Valor de saída 1: Diâmetro normalizado da tubagem (DN)

#### 5º - Cálculo do número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho \times u \times \phi_{i \text{ normalizado}}}{\mu}$$

#### 6º - Cálculo do coeficiente de atrito

$$\lambda = \sqrt{0,0055 \times \left( 1 + \left( 20000 \times \frac{\varepsilon}{\phi_{i \text{ normalizado}}} \times \frac{10^6}{Re} \right) \right)}$$

#### 7º - Cálculo das perdas de carga contínua

$$\Delta P_{\text{contínua}} = \frac{\lambda \times L}{\phi_{i \text{ normalizado}}} \times \frac{u^2}{2 \times g}$$

#### 8º - Cálculo do diâmetro interno normalizado \*

$$\Delta P_{\text{local}} = \sum K_L \times \frac{u^2}{2 \times g}$$

#### 9º - Cálculo do total das perdas de carga

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{localizada}} + \Delta P_{\text{contínua}}$$

Valor de saída 2: Valor das perdas de carga

#### 10º - Cálculo do volume total de glicol presente na instalação

$$V [m^3] = \pi \times \phi_{i \text{ normalizado}}^2 \times L$$

Valor de saída 3: Volume total de glicol na instalação

